

面向 5 G 无线通信系统的关键技术综述

杨绿溪 何世文 王毅 代海波

(东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096)

摘要: 对未来无线通信系统的几种潜在的关键通信技术, 如异构网络、大规模多输入多输出(MIMO)通信、绿色通信和毫米波通信, 给出了较详尽的论述与讨论。首先简要介绍了未来无线通信网络结构的异构化变化所引起的复杂干扰信号的出现及能源消耗增加问题。介绍了大规模 MIMO 通信技术的优点, 大规模 MIMO 通信的研究现状与研究难点。详尽叙述了分别以频谱效率、能源效率和资源效率最大化为目标的绿色无线通信传输优化问题的解决方案。最后, 给出了进一步解决频谱稀缺问题的毫米波无线通信系统的混合波束成形的方案。

关键词: 大规模多输入多输出; 异构网络; 绿色通信; 毫米波通信

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Key Technologies for 5 G Wireless Communication System

Yang Lüxi, He Shiwen, Wang Yi, Dai Haibo

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: Detailed survey and discussion on several potential key technologies are provided for the future wireless communication systems, such as heterogeneous wireless networks, massive multiple-input multiple-output (MIMO) communications, green communications and millimeter-wave communications. First, the appearance of complicated interference signals and the increase of energy consumption resulted from the change of the heterogeneous structure in the future wireless communication networks are introduced. Second, the advantages, the state-of-the-art technologies and the difficulties of the massive MIMO are respectively analyzed. Then, the mathematical problems of maximizing spectrum efficiency, energy efficiency and resource efficiency are thoroughly described. Finally, the hybrid beamforming scheme of the millimeter-wave wireless communication system is given to deal with the lack of spectrum resource.

Key words: massive multiple input multiple output; heterogeneous networks; green communications; millimeter-wave communications.

引 言

经过 20 多年的飞速发展, 移动通信给人们的生活方式、工作方式以及社会的政治、经济等各方面都

带来了巨大的影响。如今的人类社会迈进了高效率的信息化时代,小型移动通信设备普及,多媒体等数据业务需求呈现爆发式增长。据预测,到2020年,移动通信网络将面临1 000倍容量和100倍连接数增长挑战,同时还需要满足用户友好接入、网络本身灵活升级部署和低成本运营维护等需求。面向2020年以后人类信息社会需求的5G宽带移动通信系统将成为一个多业务、多技术融合的网络系统,通过技术的演进和创新,满足未来广泛的数据业务及连接数的发展需求,并进一步提升用户的体验^[1-3]。

随着个人和行业的移动互联网和物联网应用快速发展,移动通信网络系统结构将发生重要变化,将由传统的宏基站和用户终端组成的蜂窝网络架构,转变为由多样化的通信设备组成的异构移动通信网络结构,例如研究者们通常所称呼的异构蜂窝网络等^[4]。无线移动通信技术与计算机及信息技术会更加紧密和更深层次地相互交叉和融合,集成电路、器件工艺、软件技术等也将持续快速发展,从而支撑未来5G宽带移动产业的发展^[5]。而随着移动通信网络规模的急剧扩大,以及多样化移动终端设备的急剧增加,移动通信系统的能源消耗也将随之急速增长,导致能效通信将成为未来通信技术发展的主要趋势之一^[6]。除了从网络架构方面提升通信系统的吞吐量之外,研究人员还通过增加收发机的天线数到数百根天线,即设计大规模多输入多输出(Massive MIMO)无线通信系统来有效提升通信系统的性能,有效抑制小尺度衰落对系统性能的影响,并克服用户间、小区间干扰的影响^[7]。为了自适应地协调管理网络及提升用户的自愈能力,自组织通信技术及软件定义网络也成为未来通信系统的关键技术之一^[8]。

为了满足未来1 000倍甚至更多的通信流量的增长,单靠技术进步带来的增益是有限的,还需要寻求更多的无线通信频段,即解决微波频段稀缺这一制约通信系统速率提升的主要瓶颈问题,以满足2020年及以后无线通信市场发展的需要。最近,毫米波通信技术的发展为弥补与解决微波频段稀缺的问题提供了有效的途径^[9]。但是,如何有效地利用毫米波频段来提升通信系统容量却是通信技术人员仍需解决的关键技术难点之一。

1 无线通信网络的异构化演化

1.1 异构无线通信网络

近年来,集成电路技术快速发展,通信系统和终端能力极大提升,通信技术和计算机技术深度融合,各种无线接入技术逐渐成熟并广泛应用。未来第五代移动通信系统(5G)不再是宏基站覆盖下、面向简单的传统数据语音业务、简单的短信业务的通信系统,即不能再用某项业务能力或者某个典型技术特征来简单定义,而是多样化的异构密集分布网络节点覆盖下、面向各种服务需求的多业务、多技术融合的新型网络系统。其实早在4G移动通信系统中(例如LTE-Advanced),就提出采用多样化的网络节点或覆盖区域,包括宏小区(macro cell)、微小区(micro cell)、微微小区(pico cell),中继(relay)、家庭基站(femto cell)、WiFi接入点等,以及相应的各种不同业务需要的通信收发装置。如图1所示,图1(a)是指传统宏蜂窝小区基站覆盖所构成的传统通信网络系统,图1(b)则是包括多样化的发射装置与接收节点的异构蜂窝网络系统。

传统的基于信噪比或者接收信号强度的接入节点选择机制将不再适用于多样化通信节点的异构通信系统网络。为了实现负载转移,并有效提升网络吞吐量及弥补宏基站覆盖的黑洞,异构网络中引入了各种不同发射功率的接入节点。而要真正发挥这些接入节点的功能,将需要引入新颖的接收节点选择机制。例如文献[10]中引入了覆盖范围扩展机制,即用户节点在所接收的低功率接入节点的信号强度上附加上一定的偏量值,并基于此修正值来选择合适的接入节点。显然,这种修正的接入机制可以更有效地实现负载均衡转移的目的。

在当前面向第五代移动通信系统(5G)的理论与技术研究中,有关异构网络的内容至少包括小小区(small cell, SC)部署和D2D(device-to-device)通信这两大技术^[11,12]。前者是指利用小而精致基站

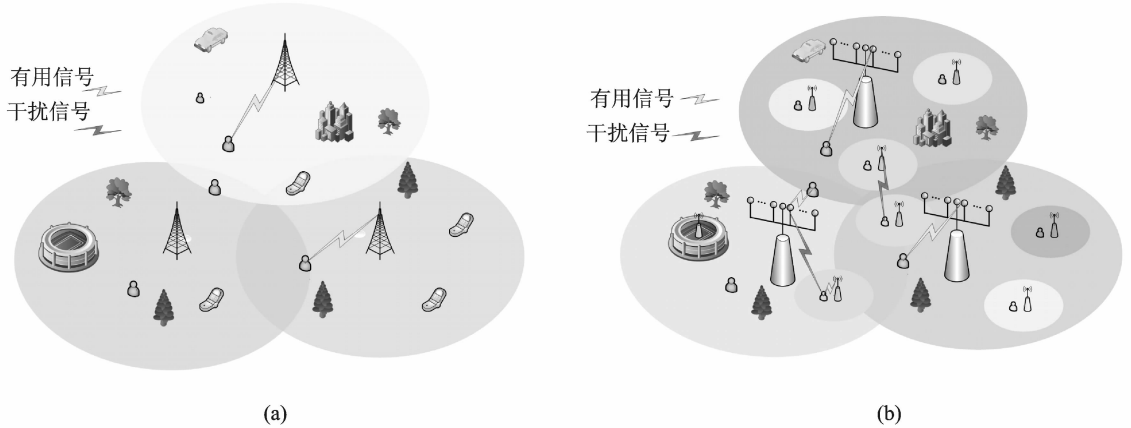


图1 传统网络与异构网络

Fig. 1 Conventional cellular network and heterogeneous cellular network

(small cell)的低功耗和低花费特点,将它们部署在现有的宏蜂窝网络下以实现整个网络的数据容量的提升和满足更高的服务需求^[11];后者是为应对局部区域突发性的通信需求,蜂窝网络下的一些物理位置相近的移动装置被赋予相互之间通过直达链路传递数据信号的能力,这种通信方式被称为D2D通信^[12,13]。

尽管这两种异构网络架构能提供巨大的网络性能增益,但是它们的部署仍然面临一些挑战,其中干扰的管理就是一个很棘手的问题。相比于传统通信网络而言,由于异构通信网络中宏基站与低功率基站均采用相同的频段,小小区干扰、小区内干扰以及用户间干扰将会更加严重。具体说,虽然小小区(SC)部署或D2D通信通过重复利用蜂窝网络的现有资源能够提高频谱效率,增加系统容量和降低宏基站的负载,但是这样会对宏蜂窝用户、其他的小小区用户或D2D用户均可能产生干扰。在异构网络中,进一步提升数据速率或服务用户数会使得一部分宏蜂窝用户转变为小小区用户或进行D2D通信,这种部署密度的增大进而使得大部分减轻网络中干扰的方法变得复杂或无效,反过来又影响网络的性能。因此,研究与探索适用于异构无线通信网络的多点协作机制,也自然而然地成为解决上述问题的有效技术之一^[14]。而大规模MIMO技术的出现也缓解了这种矛盾。但是,在D2D通信中,随着天线数的增多,D2D自身又会消耗更多的能量。另外,基于D2D装置储存的能量有限,近期兴起的无线功率传输(Wireless power transfer, WPT)技术可被用于延长这种移动装置的寿命。这些新技术之间既矛盾又互补的关系,使得异构网络中产生的干扰变得异常复杂和严重,因此其资源分配问题,特别是针对分布式异构网络节点的资源分配问题,在5G通信中将是一个非常值得研究的方向^[15]。

另外,低功率接入节点的随机性部署特点也给通信系统网络的系统容量、用户接入、干扰抑制等带来了更加艰巨的挑战。同时,随着通信系统网络装置的急剧增加,整个网络系统所消耗的能量也呈指数方式增加,这也激发了通信技术向绿色通信的方向迈进。

1.2 异构无线通信网络中的分布式资源分配

在异构无线网络中,存在两种资源分配方案:局部资源分配(小小区用户/D2D用户重复选取使用宏基站用户的资源)和全局资源分配(宏基站用户和小小区用户/D2D用户联合选择资源)^[16,17]。近年来,不同的场景下资源分配问题的研究引起了人们巨大的兴趣和广泛的关注^[18-25]。对于一个由分布式节点组成的异构网络中的资源分配问题,小小区用户或D2D用户的个体或联盟的行为能够利用博弈论的内在特性进行有效的建模和分析^[16,17,19],这主要是由于用户相互之间将合作或竞争地使用网络资源。

图 2 给出了使用博弈论这一数学工具优化资源分配问题的具体流程图:(1) 把优化问题建模成某种博弈模型和证明它存在均衡且恰好是这个优化问题的局部或全局最优解;(2) 利用传统的优化方法或学习算法去找到这个均衡点。因而, 非合作或合作博弈理论方法已经被广泛用于研究无线通信网络的资源分配问题, 并且大部分是设计基于博弈理论框架的分布式算法来降低宏基站的计算负担^[26-30]。

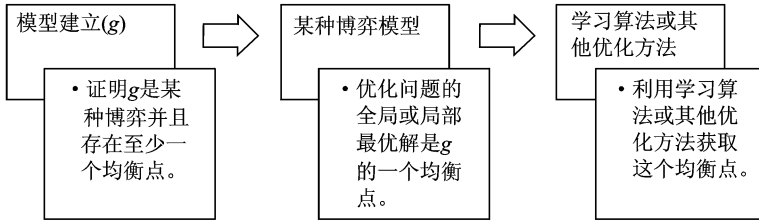


图 2 在异构网络中针对资源分配问题基于博弈理论的学习方法流程图

Fig. 2 Flowchart of game theoretic learning approaches for resource allocation in heterogeneous networks

首先, 非合作博弈方法已经在解决分布式资源分配问题方面引起了极大的关注^[28-30]。在文献[28]中, 作者利用 Stackelberg 博弈理论分析了蜂窝网络中上行功率分配问题并得到了一个次优解。文献[29]把干扰管理问题建模成两个 logit 均衡博弈, 用于最大化异构网络的频谱效率, 文中的方法是有效的, 但是仅考虑了小基站闭式接入的场景, 而没有研究基站的关联问题。另外利用这种非合作博弈方法得到的均衡点有时并不是实际的最优解。

文献[30-32]的研究表明资源分配问题可以用一类非合作博弈来精准建模, 这类博弈模型被称为势博弈。其主要原因是当某个用户单方面改变他的策略时, 这个用户的效用函数的变化需要完全反应全局优化目标的变化, 而势博弈恰好具有这样的性质。基于这一特性, 文献[16]在异构网络场景中(包含开放接入和闭式接入小小区), 利用势博弈理论的随机学习方法研究了联合的基站选取和资源分配问题。然而, 资源分配问题中势博弈的建模通常存在两种挑战:(1) 每个用户效用函数的设计需符合势博弈的定义, 但通常情况下用户之间的效用是耦合的;(2) 相对应的学习算法的设计, 能够确保收敛到最优均衡解。

针对效用函数的设计, 需要满足的两个主要性能目标是:(1) 存在性(保证至少存在一个均衡解)和(2) 有效性(对于全局目标, 所有的均衡解都是有效的)^[33]。在最近的研究中, 通过综合考虑计算复杂度、均衡存在性和所需代价等目标, 研究者建立了博弈模型并基于这种博弈模型的要求设计了相应的效用函数^[29, 34-36]。然而, 势博弈的框架建立, 尤其是完全势博弈, 受限于用户行动选择间的耦合性和势函数与目标函数的一致性。为了解决这一棘手问题, 文献[16]提出了两种有效的方法:(1) 把原优化问题转化为带有权重的多目标优化问题, 但是最优权重的确定也是一个挑战;(2) 对效用函数添加附加信息, 例如状态变量。但是, 效用函数的设计对于异构网络中许多资源分配优化问题依然是一个不可避免的挑战。

利用博弈理论这一数学工具建立一个优化问题的目的, 就是找到一个均衡点, 并确定它是一个可行的最优解^[37]。对于如何找到这个均衡点, 学习算法恰好能够通过感应外界环境的行动信息, 动态更新行动, 并最终收敛到一个均衡点。实际上, 分布的学习算法根据所需信息的不同可以分为两类: 耦合的和非耦合的^[38]。具体来说, 耦合的分布学习算法需要每个用户知道其他用户所选择的行动或得到的效用, 而非耦合的分布学习算法仅需要用户获取局部的信息。在某种条件下, 耦合的学习算法(例如, Best response dynamics (BRD)^[39], Fictitious play^[40], No-regret matching^[41], Spatial adaptive play^[42])和非耦合算法(例如, Probe and adjust^[43], Sample experimentation dynamics^[44], Reinforcement learn-

ing^[28,45,34], Learning automata^[46], log-linear learning^[47,48], γ -Logit learning^[35], Trial and error learning^[49])都能够收敛到某种博弈的均衡点。不同的学习算法适用于不同通信场景所建立的博弈模型,并且相比于耦合的学习算法而言,非耦合方法通常需要较少的信息交换。然而,某些学习算法仅仅能够确保收敛到一个均衡点,当建立的博弈模型存在多个均衡点时,这个均衡点可能仅是优化问题的一个局部最优解^[50,51]。为了克服这点不足,一种有效的方式是重复执行这种学习算法直到找到最优均衡点(也就是全局最优解),另一种就是提出能够确保收敛到最优均衡的学习算法^[16,29,31,32,35]。因此,人们倾向于设计一个同步的、分布式的非耦合学习方法去获得分布式通信系统中的全局最优解。

再次,对于合作博弈,近年主要关注的工作是通过资源分配和功率控制来缓解异构网络中用户间的干扰^[52]。文献[53]把定价机制引入到博弈论中,并提出了基于拍卖的资源分配算法去降低D2D通信中移动装置的能量消耗。但是,文中提出的算法得到的均衡解仅是优化问题的一个Pareto解。为了研究D2D之间的联盟行为,文献[54]则提出用一种联盟博弈的方法得到一个渐进最优解。

最后,在基于博弈论的学习方法应用于无线通信的研究中,能效通信作为下一代异构网络一个有效的性能度量也引起了极大的关注^[2,3]。在文献[32]中,作者利用势博弈对联合的功率分配和用户调度问题进行建模,并采用Logit学习方法收敛到最优纳什均衡点,但是功率控制的可行域只能是离散的,这受限于所选用学习方法内在的迭代机制。相应地,文献[50]提出采用BRD学习算法去获得连续功率控制的解,并利用穷举方法获得最优的子载波分配,但随着用户数或子载波数的增加,该方法的计算复杂度会急剧增大,并且BRD算法也不能保证收敛到最优的纳什均衡解。

在未来的研究中,通过整合现有的技术可以从资源分配的角度对5G通信网络的架构做进一步的探讨。例如,假设存在这样一个网络系统:在传统的蜂窝网络中部署有D2D通信,每个D2D传输端能够重复利用蜂窝网络的资源和被赋予能量收集的功能,并且基站和每个D2D传输端的天线都是大规模的。在这样的异构网络中,如此设计的期望是获得所用技术的一些增益,如D2D通信满足局部区域的服务需求以减少基站负载和提高频谱效率,大规模MIMO技术增大无线通信的数据速率和可靠性,以及能量收集技术为每个移动的D2D传输端提供足够的能量用于信息传输。当然,资源分配问题的解决在这样的异构网络中也是急需的,并将会更加复杂,而这时博弈论和学习算法在资源分配问题中的联合应用也将存在更大的挑战。

2 大规模MIMO通信技术

2.1 大规模MIMO的特点

多输入多输出通信技术为无线蜂窝通信提供了更加灵活的技术实现空间,进而给无线通信带来了不需要使用附加发射功率和带宽的复用和分集增益的益处,从而使无线蜂窝通信系统获得明显的系统性能改善。为提高频谱利用率、增强系统覆盖性能、显著降低单位比特能耗,最近,一种具有明显增加频谱效率且同时可以降低硬件实现复杂度的新颖网络架构——大规模MIMO通信网络在通信领域得到广泛关注与研究。

实际上,MIMO通信技术,已为无线通信领域的发展带来了巨大潜能,使得通信域从最初的时域和频域维度扩展到了更为广阔的空域维度^[55]。从最初的点对点MIMO技术到以后的多用户MIMO(MU-MIMO)技术,通过在发射端和/或接收端配置多根天线,可以在不增加时频资源开销的情况下,获取空间分集增益、空间多路复用增益、空间阵列增益以及多用户分集增益等,提高系统容量和链路可靠性,最后极大提升了系统的总吞吐量。然而,随着无线数据业务的海量增长,特别是业内预测的到2020年无线通信数据量将较2010年增长千倍量级这一强势需求,现有的MIMO无线通信系统远无法满足如此庞大的信息传输要求^[56,57]。此外,随着物联网等新兴领域的兴起,各类智能终端的涌现,通信业务

类型及应用场景的多样化等,都对新一代 MIMO 无线通信系统在频谱效率、延时、高能效等性能方面提出了更高的要求^[58,59]。

从理论上来说,随着基站天线数的不断增多,系统性能可以在频谱效率、链路可靠性、干扰抑制和能效等方面获得不断提升^[60]。然而,对传统 MIMO 系统的研究和标准化制定都只考虑了少量的天线数配置,以最新的 4G 通信标准 LTE-Advanced 为例,也仅仅支持 8 个天线端口。与丰富的空间资源相比,现有的 MIMO 技术开发程度仍与其相距甚远^[7]。基于此,美国贝尔实验室著名学者 Thomas L. Marzetta 于 2010 年正式提出了大规模 MIMO 技术(Massive MIMO, Large-Scale MIMO, Large-Scale Antenna System)^[61]。该技术自提出以来,便受到工业界和学术界的广泛关注,短短几年内已经在理论研究和实际系统设计等方面取得了显著的成果,包括大规模 MIMO 系统性能分析^[62]、信道状态信息获取和信道估计^[63]、导频污染的抑制^[64]、下行预编码方案^[65]以及原型机系统设计^[66]等。

大规模 MIMO 技术是指在基站端配置远多于现有系统中天线数若干数量级的大规模天线阵列来同时服务于多个用户(通常认为天线数为上百甚至几百根,而同时服务用户数为天线数的 1/10 左右^[7])。这些天线可分散在小区内,或以大规模天线阵列方式集中放置,如图 3 所示。

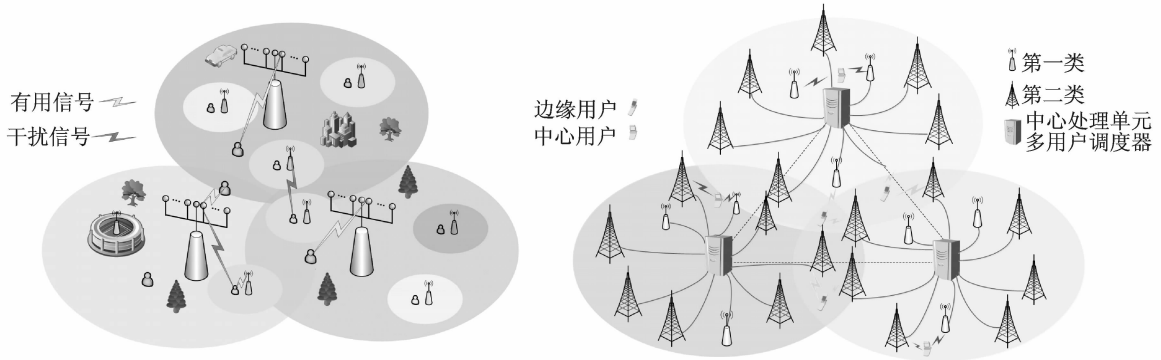


图 3 大规模 MIMO 通信网络

Fig. 3 Massive MIMO communication network

考虑到天线尺寸以及基站架设的要求,大规模天线阵列的使用与天线部署方式密切相关。目前,业内关注较多的天线排布方式包括:均匀线性阵列、均匀圆阵列、均匀面阵列以及三维圆柱阵列^[62]。上述几种天线排布方式,也正是通常意义上的集中式天线排布,即天线集中部署在基站架顶端。作为一种有益扩展,近年来有学者将大规模 MIMO 与云无线接入网(Cloud radio access network, C-RAN)架构相互融合,提出了新型的分布式大规模 MIMO 系统,有机地结合了两种技术的优势,获得了进一步的系统性能提升^[67]。

大规模 MIMO 技术之所以受到如此关注,在于部署大规模天线阵列之后,系统可以获得许多传统 MIMO 系统所无法比拟的物理特性和性能优势^[68]。主要包括:(1) 随着天线数的急剧增长,不同用户之间的信道将呈现出渐进正交特性,这意味着用户间干扰可以得到有效的甚至完全的消除,从而大大提升系统总容量;(2) 基站天线数的增加,使得信道快衰落和热噪声将被有效地平均,也即信道硬化作用,从而以极大概率避免了用户陷于深衰落,大大缩短了空中接口的等待延迟,简化了调度策略;(3) 大量天线的使用,使得波束能量可以聚焦对准到很小的空间区域,极大提升了空间分辨率;(4) 大量额外的自由度,可以用于发射信号波束赋形,甚至于采用恒定包络信号^[69],从而有效降低发射信号的峰均比,这就使得射频前端可以采用低线性度、低成本和低功耗的功放,大大降低系统部署成本;(5) 巨量天线

的使用,使得阵列增益大大增加,从而有效地降低发射端的功率消耗,使得系统总能效能够提升多个数量级^[70]。除此之外,大规模MIMO系统的传输方案可以采用简单的线性处理方式,如最大比发送或接收来达到近似最优的系统性能,从而大大简化了系统的实现复杂度。以上这些特性,使得大规模MIMO技术在实现千倍数据量、零延迟和多样化业务需求方面具有无穷的潜能。也正是由于这些前所未有的特性,业内普遍将大规模MIMO技术认为是第五代移动通信系统中最具前景的关键技术之一^[71]。

2.2 大规模MIMO研究进展举例

下面以配置大规模MIMO天线的协同多用户传输方案的研究和分析为例,给出一些简单的推导结果和说明。

假设基站端的发射天线数趋于无穷且用户端只有单根接收天线,上行链路采用简单的线性处理最大合并(即信道 \mathbf{h} 为匹配滤波器的系数),下行链路采用简单的最大比发送($\mathbf{h}^H / \|\mathbf{h}\|$)。首先看点到点MIMO通信系统,简单的窄带通信系统中的发射信号与接收信号之间关系为^[68]

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{1}$$

式中: \mathbf{G} 表示 $n_r \times n_t$ 的复数MIMO信道系数, \mathbf{x}, \mathbf{y} 和 \mathbf{n} 分别表示发射信号、接收信号和加性高斯白噪声矢量。当基站端的发射天线数趋于无穷且用户端接收天线数固定时,则有^[72]

$$\left(\frac{\mathbf{G} \mathbf{G}^H}{n_t} \right) \Big|_{n_t \gg n_r} = \mathbf{I}_{n_r} \tag{2}$$

此时,信道容量的计算可以近似为

$$C_{n_t \gg n_r} = \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_{n_r} + \frac{\rho}{n_t} \mathbf{G} \mathbf{G}^H \right) \right) \approx \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_{n_r} + \rho \mathbf{I}_{n_r} \right) \right) = n_r \log_2 (1 + \rho) \tag{3}$$

显然,收发端采用低复杂度的简单线性信号处理即可实现MIMO系统的渐近最优性能。

当用户端的接收天线数趋于无穷而基站端的发射天线数固定时,则

$$\left(\frac{\mathbf{G}^H \mathbf{G}}{n_r} \right) \Big|_{n_r \gg n_t} = \mathbf{I}_{n_t} \tag{4}$$

此时,信道容量的计算则可以近似为

$$C_{n_r \gg n_t} = \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_{n_t} + \frac{\rho}{n_t} \mathbf{G} \mathbf{G}^H \right) \right) \approx \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_{n_t} + \frac{\rho n_r}{n_t} \mathbf{I}_{n_t} \right) \right) = n_t \log_2 \left(1 + \frac{\rho n_r}{n_t} \right) \tag{5}$$

也是可达到MIMO系统的渐近最优性能。

然后再将上述推导推广到多用户MSIO下行链路和多用户SIMO上行链路通信系统,且收发机也是采用简单的最大比发送或者最大比合并接收的简单线性处理,可得到与点到点MIMO类似的结论,即,收发端采用低复杂度的简单线性信号处理也可实现多用户的MIMO系统的渐近最优性能^[68]。

进一步地,针对大规模MIMO通信系统,用户接收信干噪比(Signal to interference and noise ratio, SINR)也可以表示为只与信道的尺度衰落因子有关的简单形式,利用这些简单形式可进行相应的功率分配和用户调度等优化问题求解,从而减少了信道状态信息的反馈需求,这些特性可用于协同多小区多用户MIMO通信系统的设计,获得特别有效的传输方案^[62,70]。

利用元素取值为独立同分布的无穷维随机矢量 \mathbf{p} 和 \mathbf{q} 的如下性质

$$\frac{1}{n} \mathbf{p}^H \mathbf{p} \xrightarrow{a.s.} \sigma_p^2, \quad \frac{1}{n} \mathbf{p}^H \mathbf{q} \xrightarrow{a.s.} 0, \quad n \rightarrow \infty \tag{6}$$

针对上行链路通信系统,当基站发射天线数趋于无穷、用户为单天线、发射天线数与服务用户数的比例固定且基站采用固定接收机,如最大比合并、迫零或者最小均方误差接收机时,可推导得出如下结论^[70]:对于基站已知精确信道系数情况,用户采用有限系统中发射功率的 $1/n_t$ 倍,即可实现相同的用户速率;而对于基站所得的信道系数是估计的信道系数时,用户采用有限系统中发射功率的 $1/\sqrt{n_t}$ 倍,即

可实现相同的用户速率。而且,当采用上述这些固定接收机时,用户速率可以表示成信道大尺度衰落因子的函数,即只与统计信道信息有关。人们可以利用这一特性研究基于统计信道状态信息的用户功率分配,进而减少基站端对用户功率分配矢量的更新频率,最后减少了多点协作 MIMO 算法的实现复杂度及运算量^[73,74]。其实,2012 年的文献^[75]就研究了通过有限反馈方式获得信道状态信息的多输入单输出(Multiple input single output, MISO)广播信道采用正则迫零(Regularized zero-forcing, RZF)波束成形时,用户速率有关统计信道信息的表达式,而且利用所获得的简洁表达式研究了用户调度问题及反馈方案设计。更进一步,为了减少多点协同下行链路波束成形优化问题的求解复杂度及获得波束成形的解析表达,上下行链路间的对偶关系也成为人们求解波束设计优化问题的常用方法。当基站节点的发射天线数趋于无穷时,发射功率最小化优化问题的上下行链路对偶关系也可以描述成只与信道统计信息有关的上下行链路对偶关系^[76],从而简化相应的多点协作波束成形优化设计。

此外,相比于常规 MIMO 通信系统而言,大规模 MIMO 通信的另一大特点是波束集中能量强,且空间分辨高,即它可以有效地划分空间位置,进而有效抑制用户间的干扰或者小区间的干扰。利用这一特性,文献^[77,78]研究了联合空间划分和空间复用机制、机会波束成形机制、用户调度和下行链路调度机制,虽然这两篇文献的研究是基于全维 MIMO(即 3D-MIMO)通信系统,但它们均假设垂直方向的波束方向是固定波束,如 DFT 波束成形,因此,如何联合垂直和水平两个方向,同时结合大规模 MIMO 通信的波束能量集中特点,研究更加有效的全维波束成形机制,也是未来无线通信系统的研究方向之一。

2.3 大规模 MIMO 技术的难题与挑战

虽然大规模 MIMO 技术呈现出极具吸引力的特性,但是这些特性的实现却十分依赖于基站端对信道信息(Channel state information, CSI)的获取程度^[7]。针对现有蜂窝系统中的两种双工制式,即时分双工(Time division duplex, TDD)和频分双工(Frequency division duplex, FDD),其 CSI 获取方式和导频开销也有很大的不同。在大规模 MIMO 技术出现的初期,大多数学者都只针对 TDD 制式下大规模 MIMO 的相关内容进行研究,这主要是从 CSI 获取时的导频开销角度来考虑的^[68]。由于在 TDD 制式下,可以利用信道互易性,通过用户发送上行训练序列,基站端直接估计出 CSI,因而导频开销量只与用户数成正比,而用户数相对较小,所以导频开销量基本可以忽略不计。而在 FDD 制式下,需要基站发送下行训练序列,由各用户估计 CSI 再通过反馈链路反馈至基站端,导频开销量将与基站端天线数成正比。而在大规模 MIMO 系统中,基站端天线数众多,直接导致了导频开销量庞大,影响到了系统的有效可达速率。虽然 TDD 制式对于实施大规模 MIMO 技术具有先天的优势,但是考虑到多小区蜂窝系统时,由于导频数量的有限,在不同小区间势必需要共用导频序列,而这将导致严重的导频污染现象,直接影响到 TDD 制式下大规模 MIMO 系统的容量性能,也成为制约大规模 MIMO 系统性能的瓶颈^[68]。针对导频污染问题,文献^[64,79]给出了导频污染抑制或消除的方案,一定程度上缓解了导频污染现象。虽然 FDD 制式下大规模 MIMO 系统的训练序列开销过大,但是考虑到现行蜂窝系统中绝大多数都是 FDD 制式,而且全球范围内颁发的 LTE 牌照中多数频带指定使用 FDD 制式,因而为了能够平滑过渡,从工业界的角度看,在 FDD 制式下推广大规模 MIMO 技术是大势所趋^[80]。基于此,Adhikary 等学者先期开展了大规模 MIMO 技术应用于 FDD 制式下的探索,利用信道相关性和稀疏特性,提出了两层预编码方案——联合空分与多路(Joint spatial division and multiplexing, JSMD)方案^[77]。通过用户分组,并使用信道统计信息进行第一层预编码,将原始高维信道转化为有效低维信道,从而大大降低了估计有效信道时所需要的导频开销。通过仿真实验,也验证了 JSMD 方案的可行性,为大规模 MIMO 技术在 FDD 制式下的推广奠定了基础。

随着通信系统的收发天线数量增加,收发机波束矩阵的计算复杂度也成指数级增加,特别是涉及矩阵乘法、矩阵求逆的波束成形优化设计,其复杂度将导致现有收发机的计算能力无法承受。因此,针对大规模 MIMO 通信系统,如何设计有效的低复杂度的收发机波束成形及功率分配算法,自然而然地成为重要研究课题之一^[81,82]。而且,伴随着通信系统的收发天线数量增加及移动用户终端节点的增加,通

信系统的能量消耗也成指数级增加。因此,如何有效地减少大规模MIMO通信系统的能量消耗也成为热点话题,特别是在能量消耗成为下一代无线通信系统的关键指标之一的大背景下,高效的大规模MIMO通信技术的设计与实现也会是5G无线通信技术的主要方向之一。

综上所述,虽然大规模MIMO系统具有如上所述的诸多优越特点,但是如何突破基站侧天线个数显著增加所引发的无线传输及资源调配技术瓶颈问题,及探寻适于大规模协作通信场景的无线传输与空中接口理论方法等,将成为大规模MIMO通信技术研究中亟待解决的基本问题。特别是在频分双工通信系统中上下链路间不存在互异性的特点,基站发射端难以获得信道信息,导致简单的相干波束设计也将难以实现。而且,在复用因子为1的无线通信系统中,如何有效地解决大规模MIMO的TDD通信系统的信道估计与导频污染问题也是相关研究的难点。因此,5G通信系统中使用大规模MIMO通信技术仍然需要解决许多的关键技术问题^[61,83]。

尽管大规模MIMO技术在理论研究上和实际系统中仍然存在一些问题有待解决,但随着对大规模MIMO系统研究结果的不断完善,其预期所带来的性能优势和特性也越来越得到工业界和学术界的肯定。并且随着大规模MIMO核心问题的不断解决,有理由相信大规模MIMO技术将在新一代无线通信系统中发挥更大更广阔的作用。

3 绿色通信技术

近年来,信息通讯技术所带来的能量消耗问题吸引了全球通信领域研究人员的广泛关注,也给全球通信技术可持续发展带来了一大挑战。信息通讯技术所消耗的能量约占全球能量消耗的3%,而且每年以15%~20%的速度增长^[84]。伴随4G通信网络的普及,信息通讯技术所带来的能量消耗也随之变得更加严重。而零等待零距离通信的全球即连5G通信系统的目标是要实现通信系统能源效率改善1000倍。

目前,很多学术研究团队及企业研究团队集中精力研究能效(绿色)通信技术。而这些能效通信技术主要以提升通信系统的能源效率为目的,但某种程度上降低了通信系统的频谱效率。即现有文献研究通信技术要么以提升通信系统容量为目的,要么以提升通信系统能源效率为目的。例如考虑多小区多用户的MISO下行链路系统,为了方便叙述,将图1(a)模型的基站j的服务用户k的接收信号表示为

$$y_{j,k} = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{K_m} \mathbf{h}_{m,j,k}^H \mathbf{w}_{m,l} x_{m,l} + n_{j,k} \quad (7)$$

式中: M 表示协同的小区数且每个小区包含一个多天线基站,基站 m 服务 K_m 个单天线用户, $\mathbf{h}_{m,j,k} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ 表示基站 m 到基站 j 的服务用户 k 的信道系数, $\mathbf{w}_{j,k}$ 表示基站 j 给其服务用户 k 的预编码向量, $x_{m,l}$ 表示基站 m 给其服务用户 l 的发射信号, $n_{j,k}$ 表示基站 j 的服务用户 k 的加性高斯白噪声,其均值为0,方差为1。基站 j 的服务用户 k 的接收信干噪比(SINR)的计算式为

$$\text{SINR}_{j,k} = \frac{|\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k}|^2}{\sum_{\langle m,l \rangle \neq \langle j,k \rangle} |\mathbf{h}_{m,j,k}^H \mathbf{w}_{m,l}|^2 + 1} \quad (8)$$

此时,基站 j 的服务用户 k 的速率可计算为 $R_{j,k} = \log_2(1 + \text{SINR}_{j,k})$ 。通常,多小区多用户通信系统的协同波束设计主要集中于两类优化问题的求解,其一是在满足一定功率约束条件下,设计协同波束成形,使得系统“和速率”最大化,即

$$P_0: \max_{\{\mathbf{w}_{j,k}\}} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} R_{j,k} \quad \text{s. t.} \quad \sum_{k=1}^{K_m} \mathbf{w}_{j,k}^2 \leq P_j, \forall j \quad (9)$$

式中: P_j 表示基站 j 的最大发射功率约束。其二是在满足一定服务质量需求的条件下,设计协同波束成形,使得系统的发射总功率最小化,即

$$P_1: \min_{\{\mathbf{w}_{j,k}\}} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \mathbf{w}_{j,k}^2 \quad \text{s. t.} \quad \text{SINR}_{j,k} \geq \gamma_{j,k}, \forall j, k \quad (10)$$

其中, $\gamma_{j,k}$ 表示基站 j 的服务用户 k 的目标服务质量 (Quality of service, QoS) 需求。基于发射功率最小化的协同波束设计问题虽然在某种程度上是从系统能源效率的优化设计出发的, 但是这种设计方法没有从直接的角度使系统能源效率最大化或者使系统资源效率最大化。若直接从能源效率最大化角度设计协同波束成形, 其优化问题可以表示为

$$P_2 : \max_{\{\omega_{j,k}\}} \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_u} R_{j,k}}{\zeta \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_u} \omega_{j,k}^2 + MN_t P_c + P_0} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \text{SINR}_{j,k} \geq \gamma_{j,k}, \sum_{k=1}^{K_u} \omega_{j,k}^2 \leq P_j, \forall j, k$$

式中: P_c 表示每根天线所有的功率消耗, P_0 表示维持基站活跃状态所需的固定功率消耗, ζ 表示功率转换效率且 $\zeta \geq 1$ 。图 4 给出了多小区多用户通信系统中, 协同系统容量最大化与协同系统能效最大化波束成形算法的性能比较曲线^[85]。

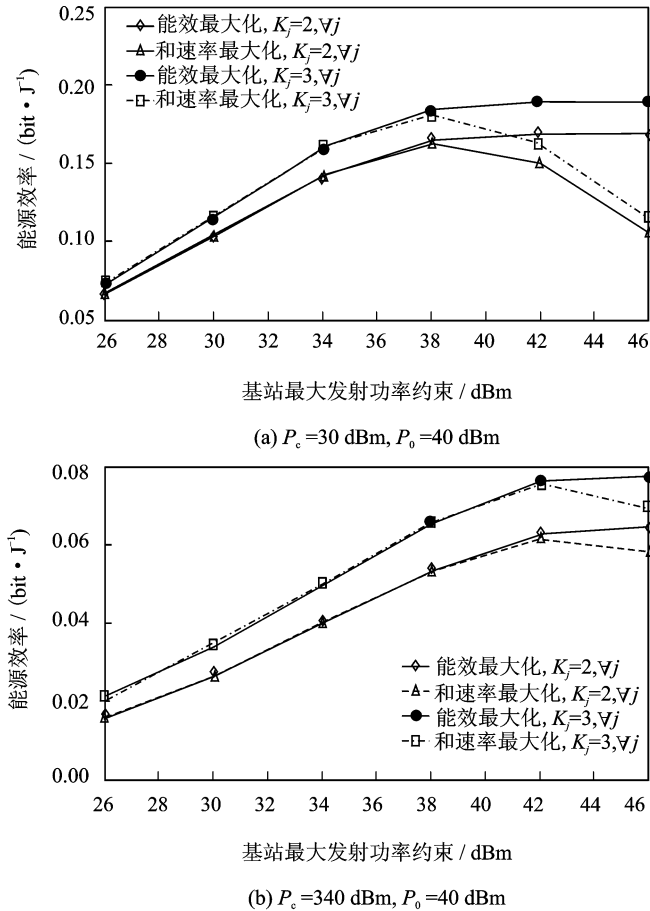


图 4 协同能效算法与和速率最大化性能比较

Fig. 4 Performance comparison of coordinated energy efficient algorithm with sum-rate maximization algorithm

如图 5 所示, 虽然在低发射功率情况时, 满功率发射可以同时实现最优的频谱效率与能源效率, 但

是在高发射功率情况时,频谱效率与能源效率却呈现出不同的增长趋势^[85-89]。在通信网络系统中,如何有效权衡这两者的优势也自然而然地成为了通信技术研究的重点及探讨平衡频谱效率与能源效率的基本框架^[90]。特别地,如何同时实现高频谱效率与高能源效率的通信技术已成为面向高频谱效率、高能源效率的5G通信系统的突出问题^[91]。最近,文献^[92,93]分别研究了多小区多用户MISO下行链路系统和大规模MISO下行链路系统的资源效率优化问题。为了同时平衡系统容量及系统资源消耗,人们可以进一步从系统资源效率角度出发,其优化目标函数(即资源效率)的数学描述表示为

$$P_3: \max_{\{\omega_{j,k}\}} \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_u} R_{j,k}}{\zeta \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_u} \omega_{j,k}^2 + MN_t P_c + P_0} + \beta \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_u} R_{j,k}}{\zeta \sum_{j=1}^M P_j + MN_t P_c + P_0} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \text{SINR}_{j,k} \geq \gamma_{j,k}, \sum_{k=1}^{K_u} \omega_{j,k}^2 \leq P_j, \forall j, k$$

式中, β 表示系统容量与能源效率之间的平衡关系因子,这个因子的确定可以根据实际通信系统的需要而定,一般是由通信系统运营商确定。图5中给出了三小区且每小区3个用户,基站天线为4时,不同优化问题求解算法所对应的能源效率与频谱效率的性能比较。当 β 的取值比较小时,资源效率优化问题等价于能源效率优化问题,此时能源效率比较高,而频谱效率比较低。而当 β 的取值比较大时,资源效率优化问题等价于频谱效率(和速率最大化)优化问题,此时频谱效率比较高,而能源效率比较低。

上述频谱效率最大化、能源效率最大化及资源效率最大化波束成形优化问题均没有考虑收发机的损伤问题,如果将这一硬件影响因素考虑到波束成形优化问题中,人们将会发现一系列更加有意义的问题^[94]。考虑收发机的固定功率消耗且固定功率消耗不为零时,文献^[95]已证明,这时大规模MIMO通信系统的能源效率将为零。而文献^[96]指出:当通信系统的信道条件好或者基站/用户节点的功率转换效率不高时,基站节点的天线数量小且只服务单用户的方案是一个能源效率最佳的传输方案;而当通信系统的信道条件差或者基站/用户节点的功率转换效率很高时,大规模多用户MIMO通信系统也将成为一个能源效率最佳的通信系统。但是,这些结论是否对于资源效率优化问题成立,仍然是开放性课题,也是未来无线通信系统需研究的重点问题之一。

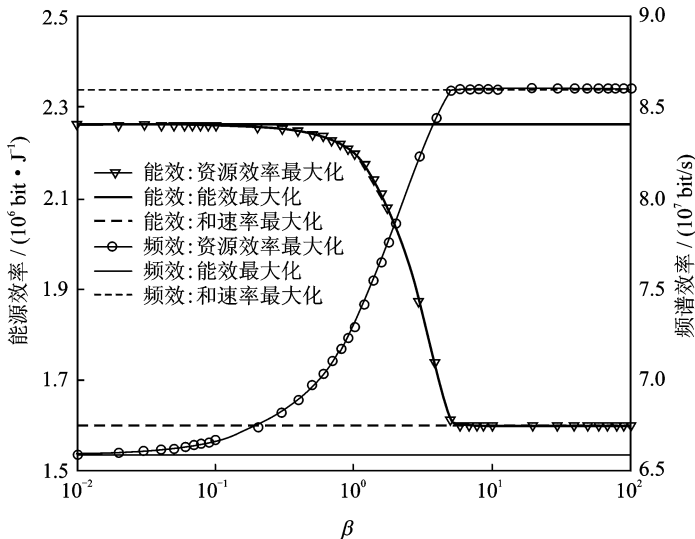


图5 能源效率与频谱效率的性能比较

Fig. 5 Comparison of energy efficiency with spectral efficiency

4 毫米波高频段通信技术

利用毫米波段频谱进行无线通信是解决微波频段的频谱资源稀缺的有效方法之一。通常,毫米波是指频率在 30 GHz 和 300 GHz 之间、波长在 10 mm 至 1 mm 之间的电磁波。随着无线电通信技术的发展,毫米波通信将显示出越来越多的优点。在设计毫米波通信系统时,由于大气的衰减,需要考虑电磁波在大气中的传播特性,在毫米波频段,由大气中的水蒸气和氧分子引起的衰减与频率有关,因此可以实现对无线电波传播路径和大气层进行遥测的高效频谱分析。毫米波的主要缺点是在大气层中传播时其频率选择性吸收比低频段的无线电波更为严重,因此毫米波更适用于短距离无线通信系统^[97]。

毫米波通信与微波通信的显著区别在于毫米波传输所导致的传输信道模型、多径数目、衰落特性、散射特性、到达角/离开角的典型稀疏特性等。受限于毫米波的上述传输特性,现有微波频段的 MIMO 通信系统的很多理论方法,如信道建模、信道估计及预编码设计技术等,都常常不能直接应用于毫米波 MIMO 通信系统。为了克服毫米波传输距离较短的不足之处,同时保持现有 MIMO 技术的优势特点,结合数字域波束成形及模拟域波束成形的所谓“混合波束成形”将是 5 G 毫米波通信系统的主要技术之一。图 6 给出了传统 MIMO 通信系统架构以及目前广泛研究的毫米波 MIMO 通信系统架构。从图中可以看出,毫米波 MIMO 通信系统中结合了数字域波束成形及模拟域波束成形。实现混合波束成形时需要解决的首要问题仍然是微波 MIMO 通信系统中的信道信息获取问题。但是,基于混合波束成形的通信系统架构下的毫米波信道模型的建模仍然是尚未解决的问题,虽然很多文献中采用一种 S-V 信道模型,但这种模型并不一定适用于混合波束成形通信系统^[98,99]。因此,如何在 5 G 毫米波通信系统网络中充分发挥毫米波通信的作用,已成为无线通信技术研究团队不可回避的核心问题。

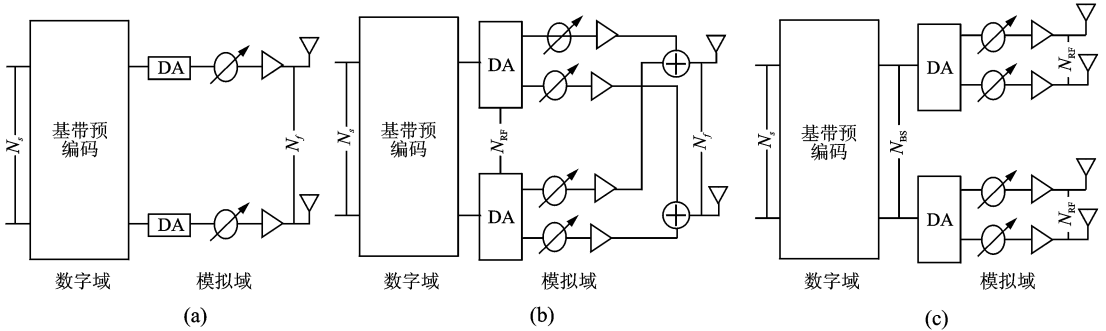


图 6 传统波束成形示意图(a)与数模混合型波束成形示意图(b)和(c)

Fig. 6 Conventional beamforming diagram (a) and mixed beamforming diagram (b) and (c)

图 6 系统模型的数字模拟混合波束成形的收发信号之间的关系可以描述成如下关系

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{G} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (13)$$

式中: \mathbf{F}_{RF} 表示模拟波束成形矩阵,且每个元素只是相位不同,即 $(\mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{RF}^*)_{l,l} = N_t^{-1}$,而 \mathbf{F}_{BB} 表示数字(基带)波束成形矩阵,其每个元素的幅度与相位均可不同^[100,101]。

图 6 的右图系统模型的数字模拟混合波束成形的收发信号之间的关系可以描述成如下关系

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{G} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (14)$$

式中 \mathbf{F}_{RF} 表示模拟波束成形矩阵且具有如下形式

$$\mathbf{F}_{RF} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}(\theta_1) & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{w}(\theta_{N_s}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{w}(\theta_1)$ 是 $N_{BS} \times 1$ 的列向量且元素幅度为 1。

相比于传统数字波束成形而言,混合波束成形需要设计两个独立的波束成形矩阵,且模拟波束矩阵只有相位可以调整,而幅度是恒定值,也就是附加常数模波束成形的约束。这样,点到点 MIMO 通信系统的频谱效率最大化混合波束成形优化问题可以描述如下

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{F}_{RF}, \mathbf{F}_{BB}} \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I} + \frac{\rho}{N_s \sigma_n^2} \mathbf{G} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{F}_{BB}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{G}^H \right) \right) \\ \text{s. t. } \mathbf{F}_{RF} \in \Phi_{RF}, \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \stackrel{?}{\leq} P \end{aligned} \quad (16)$$

式中: Φ_{RF} 表示射频预编码矩阵可行约束集,即 $(\mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{RF}^*)_{l,l} = N_l^{-1}$ 或者方程表示的形式所构成的约束集。

类似地,还可以定义出相应的点到点 MIMO 通信系统的能源效率最大化或者资源效率最大化混合波束成形设计优化问题。

5 结束语

随着无线通信网络系统的进一步普及,人们对多媒体等数据业务的需求呈现出爆发式增长,信息通信技术所带来的能量消耗也随之变得更加严重。而零等待零距离通信的全球即连 5G 通信系统的目标是要实现通信系统吞吐量增加 1 000 倍左右,且系统能源效率获得显著提升。针对这一现状,本文对未来无线通信系统几种可能的潜在关键技术,如异构网络、大规模 MIMO 通信、绿色通信以及毫米波通信,进行了详尽的论述与讨论。

参考文献:

- [1] Soldani D, Manzalini A. Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(1): 32-42.
- [2] Wu Y, Chen Y, Tang J, So D, et al. Green transmission technologies for balancing the energy efficiency and spectrum efficiency trade-off[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 112-120.
- [3] Cavalcante R, Sta czak S, Schubert M, et al. Toward energy-efficient 5G wireless communications technologies[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(6): 24-34.
- [4] Ghosh A, Mangalvedhe N, Ratasuk R, et al. Heterogeneous cellular networks: From theory to practice[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(6): 54-64.
- [5] Zhang X, Cheng W, Zhang H. Heterogeneous statistical QoS provisioning over 5G mobile wireless networks[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 46-53.
- [6] Sabellal D, Domenico A, Katranaras E, et al. Energy efficiency benefits of RAN-as-a-Service concept for a cloud-based 5G mobile network infrastructure[J]. IEEE Access, 2014, 2: 1586-1697.
- [7] Larsson E, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [8] Imran A, Zoha A, Abu-Dayya A. Challenges in 5G: How to empower SON with big data for enabling 5G[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 27-33.
- [9] Wei L, Hu R, Qian Y, et al. Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 136-143.
- [10] Madan R, Borran J, Sampath A, et al. Cell association and interference coordination in heterogeneous LTE-A cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9): 1479-1489.
- [11] Nakamura T, Nagata S, Benjebbour A, et al. Trends in small cell enhancements in LTE advanced[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): 98-105.
- [12] Tehrani M, Uysal M, Yanikomeroglu H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: Challenges, solutions, and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86-92.
- [13] Asadi A, Wang Q, Mancuso V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [14] Huang Y, He S, Jin S, et al. Area-classified interference coordination for heterogeneous cellular network[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014(1): 1-16.

- [15] Feng D, Lu L, Yuan Wu Y, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [16] Dai H, Huang Y, Yang L. Game theoretic max-logit learning approaches for joint base station selection and resource allocation in heterogeneous networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(6): 1-14.
- [17] Song L, Niyato D, Han D, et al. Game-theoretic resource allocation methods for device-to-device communication[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(3): 136-144.
- [18] Prehofer C, Bettstetter C. Self-organization in communication networks: Principles and design paradigms[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(7): 78-85.
- [19] Han Z, Ji Z, Liu K. Non-cooperative resource competition game by virtual referee in multi-cell OFDMA networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(6): 1079-1090.
- [20] Bjornson E, Sanguinetti L, Hoydis J, et al. Optimal design of energy-efficient multi-user mimo systems: Is massive MIMO the answer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(99): 1-16.
- [21] Bjornson E, Kountouris M, Debbah M. Massive mimo and small cells: Improving energy efficiency by optimal soft-cell coordination[C]//2013 20th International Conference on Telecommunications (ICT). Casablanca, Morocco, IEEE, 2013: 1-5.
- [22] Chen X, Yuen C, Zhang Z. Wireless energy and information transfer tradeoff for limited feedback multi-antenna systems with energy beamforming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(1): 407-412.
- [23] Meshkati F, Poor H, Schwartz S, et al. An energy efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(11): 1885-1894.
- [24] Buzzi S, Zappone A. Potential games for energy-efficient resource allocation in multipoint-to-multipoint CDMA wireless data networks[J]. *Physical Communication*, 2013, 7: 1-13.
- [25] Ngo H Q, Larsson E, Marzetta T. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [26] Fodor G, Dahlman E, Mildh G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(3): 170-177.
- [27] Xiao Y, Chen K C, Yuen C, et al. Spectrum sharing for device-to-device communications in cellular networks: A game theoretic approach[C]//Proc IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DYSpan). McLean, VA, USA; [s. n.], 2014: 60-71.
- [28] Guruacharya S, Niyato D, Hossain E, et al. Hierarchical competition in femtocell-based cellular networks[C]//Proc 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. Miami, USA; IEEE, 2010: 1-5.
- [29] Bennis M. Self-organization in small cell networks: A reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(7): 3202-3212.
- [30] Xu Y. Opportunistic spectrum access using partially overlapping channels: Graphical game and uncoupled learning[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(9): 3906-3918.
- [31] Zheng J, Cai T, Xu Y, et al. Distributed channel selection for interference mitigation in dynamic environment: A game theoretic stochastic learning solution[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(9): 4757-4762.
- [32] Zheng J. Optimal power allocation and user scheduling in multicell networks: Base station cooperation using a game-theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(12): 6928-6942.
- [33] Marden J, Roughgarden T. Generalized efficiency bounds in distributed resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(3): 571-584.
- [34] Nowé A, Vranx P. Reinforcement learning: State-of-the-art[M]. New York, NY, USA; Springer, 2012.
- [35] Song Y, Wong S H, Lee K. Optimal gateway selection in multi-domain wireless networks: A potential game perspective [C]//Proc Proceedings of the 17th ACM Annual International Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Las Vegas, NV, USA; ACM, 2011: 325-336.
- [36] Rose L, Perlaza S, Le M C, et al. Self-organization in decentralized networks: A trial and error learning approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(1): 268-279.
- [37] Rose L, Lasaulce S, Perlaza S, et al. Learning equilibria with partial information in decentralized wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(8): 136-142.
- [38] Xu Y, Anpalagan A, Wu Q, et al. Decision theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: Strategies, challenges and solutions[J]. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1689-1713.
- [39] Monderer D, Shapley L S. Potential games[J]. *Games and Economic Behavior*, 1996, 14(1): 124-143.
- [40] Marden J, Arslan A, Shamma J. Joint strategy fictitious play with inertia for potential games[J]. *IEEE Transactions on Au-*

Automatic Control, 2009, 54(2): 208-220.

- [41] Zheng J, Cai Y, Xu Y, et al. Distributed channel selection for interference mitigation in dynamic environment: A game theoretic stochastic learning solution[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(9): 4757-4762.
- [42] Xu Y, Wang J, Wu Q, et al. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks: Global optimization using local interaction games[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(2): 180-194.
- [43] Huttegger S M. Probe and adjust[J]. *Biological Theory*, 2013, 8(2): 195-200.
- [44] Marden J, Young H, Arslan G, et al. Payoff based dynamics for multi-player weakly acyclic games[C]//Proc 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, Louisiana, USA: IEEE, 2007:3422-3427.
- [45] Coggan M. Exploration and exploitation in reinforcement learning[C]//Proc Fourth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA'2001). Yokusika City, Japan: IEEE, 2001:1-44.
- [46] Xu Yuhua, Wang Jinlong, Wu Qihui, et al. Opportunistic spectrum access in unknown dynamic environment: A game-theoretic stochastic learning solution[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(4): 1380-1391.
- [47] Marden J, Shamma J. Revisiting log-linear learning: Asynchrony, completeness and payoff-based implementation[C]//Proc 48th Annual Allerton Conf on Communication, Control, and Computing (Allerton). Monticello, Illinois: IEEE, 2010:1171-1172.
- [48] Tatarenko T. Proving convergence of log-linear learning in potential games[C]//American Control Conference (ACC). Portland, OR, USA: IEEE, 2014: 972-977.
- [49] Young H P. Learning by trial and error[J]. *Games and Economic Behavior*, 2009, 65(2): 626-643.
- [50] Buzzi S, Colavolpe G, Saturnino D, et al. Potential games for energy-efficient power control and subcarrier allocation in uplink multicell ofdma systems[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(2): 89-103.
- [51] Huang Yongming, Zeng Gan, Yang Luxi, et al. Distributed multicell beamforming design approaching pareto boundary with max-min fairness[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(8): 2921-2933.
- [52] Saad W, Han Z, Debbah M, et al. Coalitional game theory for communication networks[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(5): 77-97.
- [53] Wang F, Xu C, Song L, et al. Energy-aware resource allocation for device-to-device underlay communication[C]//Proc 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest, [s. n.], 2013:6076-6080.
- [54] Li Y, Jin D, Yuan J, et al. Coalitional games for resource allocation in the device-to-device uplink underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(7): 3965-3977.
- [55] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. *European Transactions on Telecommunications (ETT)*, 1999, 10(6): 585-596.
- [56] Incorporated Q. The 1000x data challenge [EB/OL]. <http://www.qualcomm.com/1000x/>, 2013-11-20.
- [57] Forum U. UMTS forum report: Mobile traffic forecast: 2010-2020 [EB/OL]. <http://www.umts-forum.org/component/option>, 2011-5-11.
- [58] Corporation ZTE. 5G: Driving the convergence of the physical and digital worlds[EB/OL]. <http://www.zte.com.cn/en/products/bearer/201402/P020140221415329571322.pdf>, 2014-2-11.
- [59] Hwang I, Song B, Soliman S S. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(6): 20-27.
- [60] Marzetta T L. How much training is required for multiuser MIMO[C]//Proc Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC'06). Pacific Grove, California, USA: IEEE, 2006:359-363
- [61] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(1): 3590-3600.
- [62] Hoydis J, Brink S, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 160-171.
- [63] Choi J, Love D J, Bidigare P. Downlink training techniques for FDD massive MIMO systems: Open-loop and closed-loop training with memory[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 802-814.
- [64] Yin H, Gesbert D, Filippou M, et al. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 264-273.
- [65] Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2640-2651.
- [66] Shepard C, Yu H, Zhong L. ArgosV2: A flexible many-antenna research platform[C]//Proceedings of The 19th ACM Annual International Conference on Mobile computing & Networking (MobiCom). Miami, Florida, USA: ACM, 2013: 163-

166.

- [67] Liu L, Zhang R. Optimized uplink transmission in multi-antenna C-RAN with spatial compression and forward[EB/OL]. <http://arxiv.org/abs/1501.04764>, 2015-1.
- [68] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(1): 40-60.
- [69] Mohammed S K, Larsson E G. Per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(3): 1059-1071.
- [70] Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [71] Boccardi F, Heath R W, Lozano A, et al. Five disruptive technology directions for 5 G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 74-80.
- [72] Matthaiou M, McKay M R, Smith R J, et al. On the condition number distribution of complex Wishart matrices[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(6): 1705-1717.
- [73] Huang Y, Tan C, Rao B. Joint beamforming and power control in coordinated multicell: Max-min duality, effective network and large system transition[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6): 2730-2742.
- [74] He S, Huang Y, Yang L, et al. Energy efficient coordinated beamforming for multicell system: Duality based algorithm design and massive MIMO transition[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 2015: 1-99.
- [75] Wagner S, Couillet R, Debbah M, et al. The large system analysis of linear precoding in correlated MISO broadcast channels under limited feedback[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(7): 4509-4537.
- [76] Zakhour R, Hanly S V. Base station cooperation on the downlink: Large system analysis[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(4): 6441-6463.
- [77] Adhikary A, Nam J, Ahn J, et al. Joint spatial division and multiplexing-The large-scale array regime[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(10): 2079-2106.
- [78] Nam J, Adhikary A, Ahn J, et al. Joint spatial division and multiplexing: Opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 8(5): 876-890.
- [79] Müller R R, Vehkaperä M, Cottatellucci L. Blind pilot decontamination[C]// 2013 17th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA). Stuttgart, Germany: VDE, 2013: 1-6.
- [80] Jiang Z, Molisch A F, Caire G, et al. On the achievable rates of FDD massive MIMO systems with spatial channel correlation[C]// 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Shenzhen, China: IEEE, 2014: 276-280.
- [81] Kammoun A, Müller A, Björnson E, et al. Linear precoding based on polynomial expansion: Large-scale multi-cell MIMO systems[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 861-875.
- [82] Shariati N, Björnson E, Bengtsson M, et al. Low-complexity polynomial channel estimation in large-scale MIMO with arbitrary statistics[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 815-830.
- [83] Aggarwal R, Emre K C, Schniter P. On the design of large scale wireless systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 215-225.
- [84] Oh E, Krishnamachari B, Liu X, et al. Toward dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(6): 56-61.
- [85] He S, Huang Y, Jin S, et al. Coordinated beamforming for energy efficient transmission in multicell multiuser systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(12): 4961-4971.
- [86] He S, Huang Y, Jin S, et al. Max-min energy efficient beamforming for multicell multiuser joint transmission systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(10): 1956-1959.
- [87] He S, Huang Y, Yang L, et al. Coordinated multicell multiuser precoding for maximizing weighted sum energy efficiency [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 741-751.
- [88] He S, Huang Y, Wang H, et al. Leakage-aware energy-efficient beamforming for heterogeneous multicell multiuser systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1268-1281.
- [89] Xu J, Qiu L. Energy efficiency optimization for MIMO broadcast channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(2): 690-701.
- [90] Chen Y, Zhang S, Xu S, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(6): 30-37.
- [91] Tang J, So D, Alsusa E, et al. Resource efficiency: A new paradigm on energy efficiency and spectral efficiency tradeoff[J].

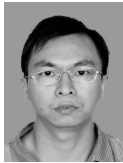
IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4656-4669.

- [92] He S, Huang Y, Lu Y, et al. Resource efficiency: A new beamforming design for multicell multiuser systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 2015:1-99.
- [93] Huang Y, He S, Qi C, et al. Balancing spectral and energy efficiencies by beamforming design for broadcast channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 2015:1-99.
- [94] He S, Huang Y, Jin S. Energy-efficient coordinated precoding for multicell system with transceiver impairments[C]//14th International Conference On Communication Systems (ICCS). Macau, China: IEEE, 2014:102-106.
- [95] Björnson E, Hoydis J, Kountouris M, et al. Massive MIMO systems with non-ideal hardware: EE, estimation and capacity limits[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 61(11): 7112-7139.
- [96] Mohammed S. Impact of transceiver power consumption on the energy efficiency of zero-forcing detector in massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11): 3874-3890.
- [97] Baykas T, Sum C, Lan Z, et al. IEEE 802.15.3c: The first IEEE wireless standard for data rates over 1 Gb/s[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 114-121.
- [98] Alkhateeb O, Ayach O, Leus G, et al. Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge[J]. Information Theory and Applications Workshop (ITA). [S.l.]: IEEE, 2013:1-5.
- [99] Hur S, Kim T, Love D, et al. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(10): 4391-4403.
- [100] Liu A, Lau V. Phase only RF precoding for massive MIMO systems with limited RF chains[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(17): 4505-4515.
- [101] Ayach O E, Rajagopal S, Abu-Surra S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1499-1513.

作者简介:



杨绿溪 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 通信与网络信号处理、MIMO空时信号处理、4G/5G 通信系统设计、协作多点 MIMO 通信与网络编码、盲信号处理与阵列信号处理, E-mail: Lxyang@seu.edu.cn。



何世文 (1978-), 男, 博士, 博士后, 研究方向: 大规模多输入多输出通信、协作通信、绿色通信、毫米波通信无线局域网通信和优化理论。



王毅 (1984-), 男, 博士生, 研究方向: 大规模 MIMO、协作通信和信道估计。



代海波 (1988-), 男, 博士生, 研究方向: 异构网络资源分配、博弈论和学习理论。