



专题:分层异构无线网络

密集立体覆盖:未来移动通信的机遇和挑战^{*}

陈巍¹,王东明²,王家恒²,高飞飞³,彭木根⁴

(1.清华大学电子工程系 北京 100084;2.东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096;
3.清华大学自动化系 北京 100084;4.北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘要:在短短的几十年中,移动通信实现了从概念提出到全球普及应用的飞速发展,目前已深刻地改变了人们的生活和工作方式,成为个人与信息网络相连接的最重要纽带之一。然而,目前适用于移动通信的频谱资源已经分配殆尽,而用户密集化、业务海量化的趋势对网络在单位面积上所支持的总容量的需求不断攀升。单纯依靠物理层传输技术的改良和平面蜂窝网络架构的演进,已经很难满足这种需求。密集立体覆盖,作为一种依托未来城市形态而产生的全新网络架构,有望提供一种在平面之外的第3个维度进行复用的全新频谱复用方式,大幅度提升移动通信网络的频谱效率。本文拟初步探讨密集立体覆盖移动通信中的若干基础问题,阐明“物理”和“逻辑”立体网络中的若干挑战及可能的应对方法。

关键词:移动通信;密集用户;立体覆盖;频谱效率;5G

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.001

3-Dimensional Dense Coverage: Opportunities and Challenges for Future Mobile Communications

Chen Wei¹, Wang Dongming², Wang Jiaheng², Gao Feifei³, Peng Mugen⁴

(1.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory on Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4.Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Within just a few decades, mobile communications have undergone a rapid growth from its initial concept to the worldwide prosperity, and essentially changed people's daily life as well as the way of working and thinking, thereby becoming the most important connection between individuals and information networks. Although almost all the spectrum resources have been devoted to mobile communications, the demand of higher capacity over a unit area is still increasing, due to the trend that the density of mobile users is increasing and the amount of traffics grow explosively. No doubt such an ever-increasing demand cannot be met by simply relying on the improvement of either physical layer transmission techniques or planar cellular infrastructures. As an emerging network architecture aiming to future metropolitan patterns, 3-deminsional dense coverage is expected to provide a novel spectrum reuse methodology, significantly improving the spectrum efficiency of mobile communication systems through spectrum reuse in the third dimension beyond the planar dimensions. Some fundamental problems of 3-deminsional dense coverage oriented mobile communications systems were investigated, the key challenges was pointed out, and possible solutions for 3-deminsional networks from both the physical and logical perspectives were provided.

Key words: mobile communication, dense user, 3-dimensional coverage, spectrum efficiency, 5G

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2013CB336600),国家科技重大专项基金资助项目(No.2013ZX03003006),北京市科技新星计划基金资助项目(No.Z121101002512051),教育部新世纪优秀人才计划基金资助项目

1 引言

移动通信网络是信息社会的重要基础架构,发展宽带无线移动通信是我国的基本战略需求。我国《国民经济和社会发展规划纲要》中明确提出“统筹布局新一代移动通信网”、“引导建设宽带无线城市”等发展需求。目前,移动通信已经逐渐实现了人类“随时 (anytime)”、“随地 (anywhere)”维系每一个人 (anyone) 与信息基础设施的紧密联系,并与其他移动用户进行交互的梦想。随着各类丰富多彩的移动应用的不断涌现以及智能手机、平板、笔记本电脑在人群中的逐渐普及,移动用户的业务将呈现多样化和海量化,移动数据业务量几乎呈指数增长,即使能够支撑吉比特的 4G 系统,也将在 21 世纪中叶落后于业务需求。这对 5G 移动通信的频谱效率提出了更高的要求。

建设宽带无线城市所需考虑的另一个重要背景是城镇化。中国社会科学院《2012 年中国社会形势分析与预测》指出“2011 年我国城镇人口所占比重将首次超过 50%,并不断增长”。随着大型城市人口数量的不断攀升,必须依靠高层建筑容纳更多的人口。全球建筑调查机构安波利斯 (Emporis) 数据显示,我国高层建筑年增长率超过 20%。大型都市的平均建筑高度不断攀升,城市向复杂立体地域扩张,使得单位面积上的移动用户数量亦随之升高,在平面投影上用户趋于密集化,呈现平面密集效应,对于 5G 系统的单位面积频谱效率提出了极高的要求。综合上述两点,移动通信的频谱效率问题将成为未来无线城市宽带化发展的瓶颈。

回顾移动通信半个多世纪的发展,蜂窝系统大致经历了如下阶段。在提出伊始,主要以“覆盖优先”,重点在于无缝地提供数据接入;随着移动通信的大范围普及和推广,用户数量不断攀升,蜂窝网络在设计中开始关注单位面积上的频谱效率,所采用的具体方法就是小区的分裂和扇区化,以此提升频谱的空间复用度,这种方法所带来的问题是频繁的切换和更加复杂的干扰^[1];近年来,人们开始注意到业务需求在空间和时间上分布的不均匀性,并因此将认知无线电^[2]、基站休眠^[3]等新思路引入蜂窝网络,从而进一步提升能效和频谱效率的增益。

但是,在用户密集化、业务海量化的趋势下,未来大型都市中的部分热点区域,在空间和时间上将总处于较高的业务负载状态,因此必须依靠进一步提高网络的单位面积频谱效率予以根本上的解决。然而,由于无线通信的频谱

和能耗等资源严格受限,现有的无线传输技术也已逼近香农理论极限,传统的平面组网技术已经难以支撑城市立体化趋势下的用户平面密集效应和业务多样海量特征。因此,未来发展的一个重要机遇,就是开展立体组网的研究工作,在平面之外的第 3 个维度上复用频谱,依托城市立体化的发展趋势,实现立体小区。这也是本文拟重点讨论的内容。

2 密集立体覆盖:机遇和挑战

传统蜂窝网络依托二维平面进行部署,这导致其单位面积上的频谱效率严格受限。与此同时,随着城市立体化的发展,单位面积上的用户数量随楼层的高度呈现近似的线性增长态势。二者的内在矛盾导致了平面网络难以适应未来立体化城市发展的趋势。

通信理论也很好地支持了上述结论。从 2000 年起, Kumar 等人^[4]从信息论角度,提出了无线网络容量极限的渐进分析方法。参考文献[4]指出,即使采用最佳的中继、路由等方法,无线网络的单位用户容量也将随着用户数量的增加而趋近于 0。后续的研究工作^[5,6]虽然努力减小用户平均容量趋近于 0 的速度,但也从电磁理论基础角度说明,无线网络容量的可扩展性受制于物理学极限。以 Gupta 和 Kumar 的经典结论^[4]为例,单位用户容量随着用户数 n 趋

近于 0 的近似速度为 $\Theta\left(\frac{1}{\sqrt{n} \lg n}\right)$ 。若给定用户的分布密度,传统平面城市中覆盖范围为 1 的小区的用户数量近似为 $n \sim l^2$,而立体化城市中每个小区的用户数量近似为 $n \sim l^3$,立体城市中用户数量随小区覆盖范围的增加而迅速增加。例如,北京 CBD 核心区域的平均楼高超过 50 m,日间每平方米投影人数超过 10 人。当采用如图 1 所示的平面小区覆盖立体用户方式时,由于单位投影面积内用户数量激增,立体城市中每个用户的容量将随小区覆盖范围的增加而

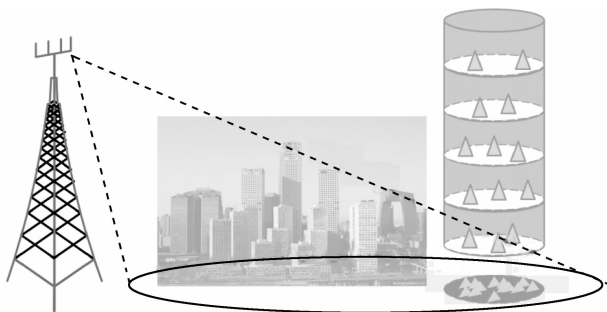


图1 平面小区覆盖立体用户方式



迅速趋近于0;若采用增加带宽的方法保证QoS(服务质量),其带来的带宽增加是频谱资源和认知无线电技术不可承受的。

城市立体化对于移动通信是一把双刃剑,既带来了如前所述的用户平面密集效应,使得传统平面覆盖方式难以保障密集用户的QoS;也提供了依托城市形态,实现网络立体化部署的潜在机遇。通过移动通信网络本身的立体化,可在平面之外的第3个维度(即高度上复用频谱)进一步提升平面投影上的频谱效率。参考文献[7]表明,立体网络中每用户的容量随用户数趋近于0的近似速度为 $\Theta\left(\frac{1}{\sqrt[3]{n \lg^2 n}}\right)$,这一速度在参考文献[8]中获得了进一步的优化。上述理论结果印证了立体化网络部署对于密集覆盖的潜在机遇。

如图2所示,立体覆盖依托于高层建筑,可以在不同高度上部署不同的蜂窝。由于无线信号的功率随着距离的增加而衰减,因此可以在垂直维度上重复利用频谱资源,从而用同频的接入点覆盖不同楼层的用户,提升单位面积的频谱使用效率。城市立体化对于密集覆盖所带来的另一种机遇在于,可以基于高层建筑架设俯视图天线,引入传统卫星通信中的立体点波束覆盖,这种覆盖方式相对于平面网络所采用的分扇区覆盖,能够获得更高的频谱复用效率。由于无线信号在空间中的辐射是三维的,网络空间部署会带来一些全新的机遇。天线在空间的立体分布,可以在同样的天线密度(取决于天线间隔)下部署更多的天线,因此立体部署的分布式天线可以更加有效地支持大规模天线协同,实现密集的空分复用,提升频谱效率,这一优势也可体现在三维点波束覆盖上。

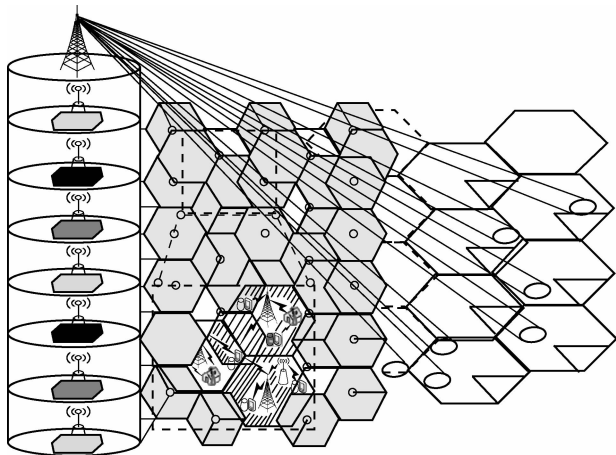


图2 立体部署的移动通信网络

密集立体覆盖不仅面临着物理层的机遇和挑战,还对网络层架构带来了根本性的变革。由于新型网络依托于城市形态而构建,天线的分布、辐射特性、蜂窝覆盖范围、最佳接入方式、调度策略等都与所部署的环境密切相关,不适宜采用相同的架构,因此在同一地理位置上将会层叠多个高度异构的多制式子网^[9]。多层次的异构覆盖,将会在“物理立体”的模式之外,产生虚拟的“逻辑”立体覆盖。如图3所示,立体分布式天线系统、三维波束、Wi-Fi、femto cell等多种网络制式层叠覆盖相同的平面区域,以发挥各自的协同优势。子网的立体分布,还会导致网络之间具有更强的相互耦合与干扰,增大子网异构协同的规模和范围,带来全新的网络顶层设计和实时管理、控制的优化机遇。

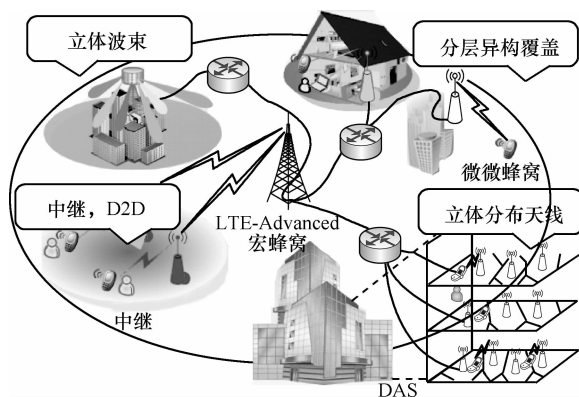


图3 逻辑立体的多层次、多制式覆盖方式

为实现密集立体覆盖中天线、节点和子网之间的高度异构特性和密集协同,本文提出一种全新的顶层设计理念——“可控自治框架”。

3 密集立体覆盖的可控自治框架

如前所述,密集立体覆盖的网络形态高度依赖于城市形态,包括建筑和地形形态等。因此,密集立体覆盖移动通信具有天然的高度异构特性。在相同地理位置的不同高度、甚至是相同高度上,都可能存在相互干扰与耦合的多制式网络模式。这一特色给网络的顶层设计带来了一个根本问题,即采用何种方式对网络进行规划、设计、管理和控制。

对密集立体覆盖中所包含的子网做一个简单的分类,其中既有蜂窝子网等集中可控的子网,也有Ad Hoc、中继、终端直通(D2D)等分布自治的子网。这两种子网分别具有不同的顶层设计特征,即“可控”和“自治”。一般来说,可控子网具有整体性能最佳的优势,但也存在信令复杂度相对较高、需

要全局信息的问题;与此同时,分布式子网则具有无需全局信息、信令复杂度低的优势,但其性能往往难以实现全局最优。在密集立体覆盖中,由于这两种子网相互重叠,共享频谱资源,同时又紧密耦合,因此采用单一的控制模式会导致全网性能下降或信令复杂度过高的问题。因此,密集立体覆盖需要“可控”和“自治”两种管控理念的有机融合。

密集立体覆盖的可控自治框架基于全新的信息论模型与分析,呈现全新的信息论特征。回顾点到点衰落信道的容量理论,对信道状态信息的不同认知程度将会导致不同的通信容量和最佳传输策略^[10]。对于仅接收机具有信道状态信息(CSIR)的情况,发射机无法进行功率自适应,最佳的传输策略是多级调制方式,可以达到无功功率自适应下的遍历容量;若收发双方同时具有信道状态信息(CSIT&CSIR),则可以采用“时域注水”的功率分配方法,以获得更高的容量。对于密集立体覆盖移动通信的方式,集中控制模块或平面具有全局的状态信息,但由于信令反馈的限制,其精确性较低;而分布式自治单元具有较为精确的本地状态信息,但缺乏全局的视角。因此,基于全局非精确状态信息的控制,结合基于本地精确状态信息的自治,构成了密集立体覆盖移动通信的网络信息理论的基本元素,如图4所示。

在信息论的基础上,进一步介绍密集立体覆盖中可控

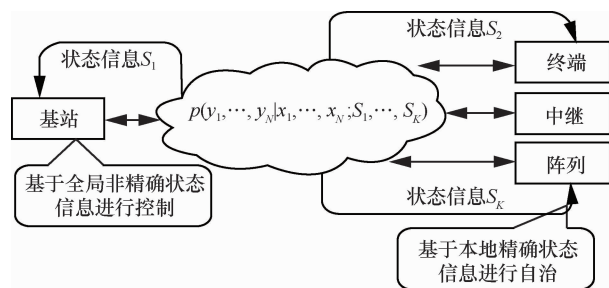


图4 密集立体覆盖可控自治架构的信息论抽象模型

自治的网络架构。在立体空间中,特别是“逻辑立体”多制式多层次异构网络重叠覆盖的情况下,子网之间的相互干扰更加复杂而密集。在密集立体覆盖中,提升协同子网的规模,能够有效地保证 QoS,同时全面提升网络效用。但大规模网络协同面临着用户数目巨大、业务需求频繁多样、同信道干扰复杂、通信环境高度动态、认知信息量大等问题,对无线资源管理提出了极大的挑战。

从网络架构的角度看,资源的最优配置需要实时地认知用户、业务、信道和网络等信息,并汇集到中心处理节点,进行全局统筹优化。这样虽然能得到全局最优的性能,却需要传递和处理所有认知信息,在密集动态环境中意味着海量的信息收集、汇聚、处理和反馈,因此完整精确的网络认知信息几乎无法获得,由此带来的巨额运算量也使得传统的集中式资源管理很难做出快速有效的响应。因此,完全集中式的优化的信令复杂度高,响应迟缓。

另一方面,在密集立体覆盖中如果完全采用分布式的优化,难以收敛到全局最优。在密集耦合的子网中,用户或网络之间本质上是对有限资源的竞争关系,表现为信道的排他性占用或相互干扰,这一矛盾在密集立体环境中更为突出。具备认知能力的用户设备能够较为精确地感知通信环境,并利用自身的处理能力快速做出响应。理论上,用户或者网络可以通过本地信息,在竞争中实现自治的资源共享,但由于缺乏全局观,这种自治通常会造成资源的低效利用。因此,在密集立体覆盖的网络架构顶层设计中将采用“可控自治”的理论和方法,其网络形态如图5所示,目标是综合考虑局部竞争和全局优化的优缺点,通过受控博弈的手段,使得本地竞争有序化,无线资源博弈向着全局最优系统性能逼近,实现空分、时分、频分、码分等多维无线资源的高效、合理、公平分配和管理。具体的实现方法就是引入“受控博弈、有序竞争”。

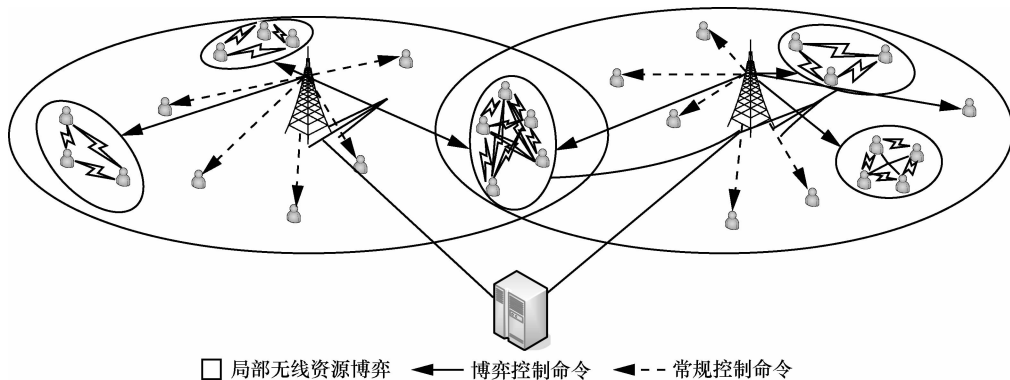


图5 可控自治架构的网络形态



“受控博弈、有序竞争”源于博弈与变分不等式 (variational inequality) 理论,在密集立体覆盖中能够对协同的深度和规模进行模块化的重组和柔性的调节,在多种网络对相同区域进行重叠覆盖时,提升协同的规模和深度,有效折中复杂性和吞吐量,实现整体性能的最优化。

采用博弈的方法分析无线网络并设计分布式的无线资源共享机制,受到广泛关注。比较普遍的方法是采用(纯策略或混合策略)非协作博弈,遵照用户完全利己性原则,最大化用户各自的性能,以网络达到纳什均衡为目标。因为纳什均衡通常不具备帕累托最优(Pareto optimal)或全局最优性,这种无序竞争方法虽然能以本地认知信息获得最大限度的分布式资源分配方案,但极易造成网络整体性能低下,同时也很难保证单一用户的通信质量;在博弈中引入适当协作,采用纳什议价(Nash bargaining)或斯坦克尔伯格博弈(Stackelberg game)等方法进行网络设计。这些方法虽然可以提高网络的整体性能,却通常导致完全集中式处理,失去了利用本地信息形成自治的分布式特性。

为适应密集立体覆盖的需求,“受控博弈、有序竞争”^[11]的设计思路通过将网络优化的效用框架分解为多个子优化问题,实现基于本地优化的自治,而同时,本地优化中的代价或定价则通过全局反馈的方式获得,并由此实现全网的控制。定价的反馈量将决定信令复杂度和整体性能最优性之间的折中,如图6所示。

有别于经典博弈方法,在密集立体覆盖中引入受控博弈的理论和方法,在局部范围控制和引导用户之间进行资源博弈,使得局部达成的自治向整体网络性能最优的方向逼近,从而享有分布式处理、交互信息少、响应迅速、逼近

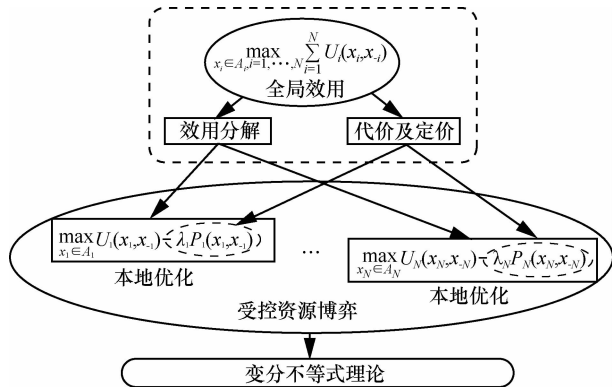


图6 “受控博弈、有序竞争”模型示意

全局最优等优点。实现受控博弈的难点是控制机制的合理设计,特别是定价与惩罚措施的系统和解析优化方法。密集立体覆盖的资源管理和子网管控中引入了变分不等式方法,这种优化、博弈、非线性方程、不动点等综合交叉的数学理论,使相同地理位置上多制式重叠覆盖的子网只用本地认知信息和少量交互信息即能实现预期的可控自治^[12]。

4 基于大规模天线协同的密集空分复用

大规模天线协同是提升频谱效率的物理层关键技术。近年来,随着 CoMP 技术的兴起,基站间相互协同程度逐步提升,蜂窝的概念亦被逐渐打破,取而代之的是分布式天线系统。如图7所示,在密集立体覆盖中,由于蜂窝的立体部署,三维立体空间中可以相互协同的天线数量将远多于二维平面网络,从而进一步提升了天线协同的规模。

大规模天线协同可以换取更高的空间分辨率^[13,14],实现密集空分复用,有效提升频谱效率,然而随着协同天线数量的提升,信令和计算复杂度激增,其信道估计和反馈将

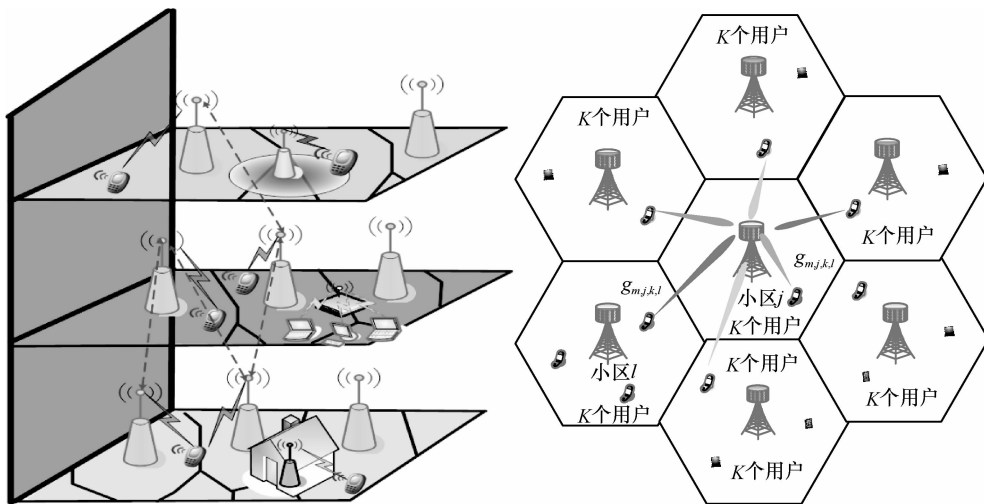


图7 立体空间中的大规模天线协同

消耗大量的时频资源,而预编码矩阵的全局优化也会产生较高的复杂度。针对信道估计与反馈问题,优化的信道状态码本设计有助于减少反馈开销和时延,拓展协同范围^[15]。而块状对角化技术则有助于在吞吐量性能和复杂性之间获得一个较好的折中^[16]。

为使读者对于大规模立体天线协同的传输体制有一个更直观的了解,以东南大学正在设计的大规模立体天线协同方案为例,其上行和下行均采用 OFDM 传输技术。对于上行链路传输,系统导频开销仅与用户个数 K 成正比,与基站天线个数无关;系统可支持的最大多普勒频移(或相干时间)限制了系统中可支持的用户数;采用与 LTE 相似的时隙结构,即一个时隙有 7 个 OFDM 符号,一个资源块(resource block, RB)有 7×12 个 RE(resource element)。假设 1 个 OFDM 符号用于信令开销, K 个 RE 作为导频,在最极端的情况下,每个时隙均有 K 个解调导频存在。图 8 给出了一种导频图案,其中深灰色区域的 RE 表示信令开销,白色 RE 表示导频,共有 36 个 RE,可以同时支持 36 个用户实现 SDMA(space division multiple access),浅灰色 RE 表示数据。导频序列可以采用时频正交,也可以采用码分正交,或它们的混合方案。而对于下行链路来说,由于大规模立体天线协同的天线数目较多,无法采用每个天线使用独立导频的模式,可通过导频的随机化处理,降低导频之间的干扰和污染。

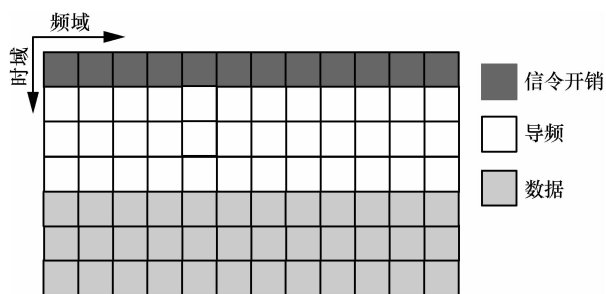


图 8 上下行导频(下行采用预编码导频)

在导频设计的基础上,对上行和下行传输系统进行进一步详细描述。对于上行链路传输,每个小区的每个用户的信息比特经过纠错编码、交织、调制,调制信号连同导频信号映射到 OFDM 的时频资源块上。在基站侧,首先进行信道估计,得到信道矩阵的估计值。为了逼近大规模立体天线协同的上行联合接收的性能极限,可采用迭代接收机。根据估计的信道参数进行低复杂度的软输入软输出(SISO)多用户检测,再进行 SISO 译码,并进行如图 9(a)所示的迭代接收。在大规模立体天线协同

中,由于存在严重的小区间干扰,在进行联合接收时,需要进行干扰估计并抑制小区间干扰。因此,干扰估计模块是接收机检测器的一个重要模块,该模块可以嵌入迭代接收机中,进行干扰协方差重构。下行多用户传输示意由图 9(b)给出,各个用户的数据信息经过纠错编码、交织、调制后,进行多用户联合预编码。为了节约开销,下行导频采用预编码导频,因此导频开销与上行相同。对于 TDD(时分双工)系统,下行波束成形可以采用复杂度较低的最大比发送,也可以采用复杂度较高的多小区 MMSE 波束成形;对于 FDD(频分双工)系统,为降低系统开销,可利用相关矩阵的互易性,仅使用统计信道信息进行立体波束成形,这在相关性很强的大规模立体多天线信道下是比较有效的。

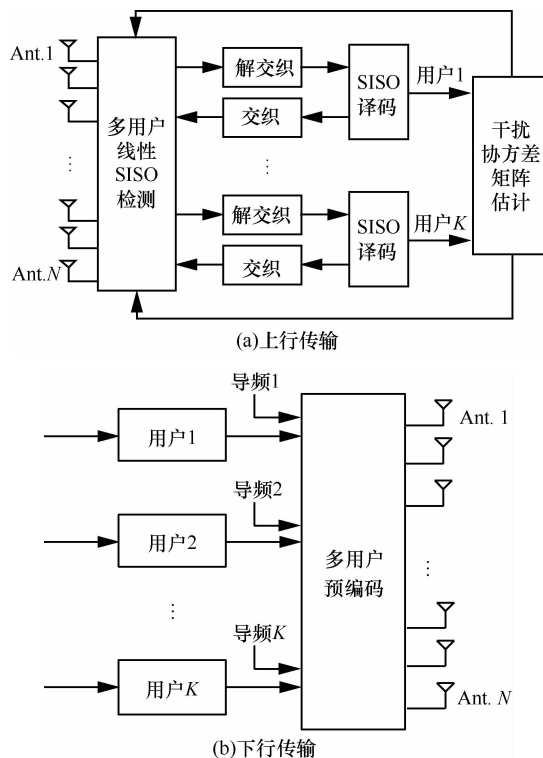


图 9 上行和下行传输系统模型

5 面向密集立体覆盖的多情境智能认知

从上述密集立体覆盖移动通信框架中不难看出,无论是宏观层面的全局控制,还是微观层面的本地自治,都需要通信单元和子网充分获取、认知、分析和学习信道、网络、业务、用户等多维度状态信息。有效地认知和学习时,各个模块和功能层之间互相协作,是提升频谱和能量效率的基础。



在过去的十多年中,人们已经充分认识到认知无线电对于提升频谱使用效率的重要作用^[2]。然而,传统认知无线电的认知主要停留在频谱感知层面,即发掘和利用未被使用的空闲频率进行业务传输,以此提升次级系统的吞吐量。这一方法的不足之处在于,对热点区域的频谱效率提升程度有限。由于热点区域整个频段的繁忙占用,空闲频谱本身所能提供的容量增益非常有限,需要从其他维度挖掘提升容量的潜力。

在密集立体覆盖移动通信中,对于信号的检测将被进一步升级到对于信息的发掘、认知、理解和学习,实现真正意义上的认知,这一趋势也在认知无线电的演进中逐渐体现^[17]。由于新兴的移动互联网业务为网络优化带来了许多全新视角,用户的位置、使用模式、业务种类等相关信息以及需求的异化、相同地理位置上重叠多制式子网与移动用户的匹配等,都有助于提升无线资源的使用效率。为此,密集立体覆盖引入多情境认知的全新思路,基于通信与模式识别学科的交叉,引入模式识别、机器学习和人工智能等方法,充分发掘网络中多种参数之间的内在关联,将认知的对象由单纯的频谱占用检测拓展到对于多维传输参数、用户及其业务的识别和预测,为立体协同提供好的认知基础,如图 10 所示。

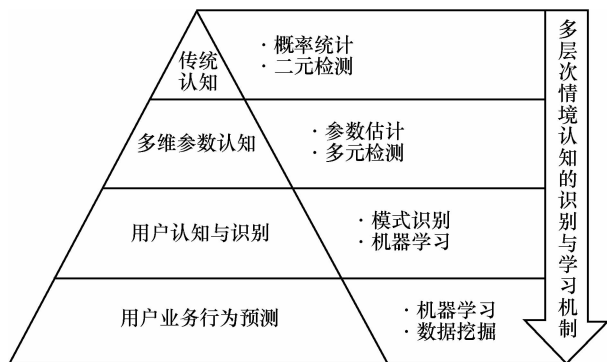


图 10 面向密集立体覆盖的多情境认知层次

下面,以清华大学自动化系模式识别与智能系统学科正在开展的物理层多维参数认知方法为例,相对具体地说明多情境智能认知。如前所述,在密集立体覆盖网络中,由于频谱资源有限,用户坐标重叠,因此存在严重的传输干扰问题。为了降低子网和用户间的干扰,必须为通信节点提供全面准确的参数认知能力,识别周边传输环境以及其他用户的传输策略与方案,为“受控自治”提供环境信息基础。然而传统认知无线电技术仅检测频谱占用情况,无法获取用户传输的状态信息,如传输电平、传输星座图、传输

帧长等,因此也就无法满足上述需求。密集立体覆盖模型则设计了全新的认知方式,尽可能多地获取周边环境的参数信息,包括频谱空洞、用户调制、用户功率、正交空谱等多维无线资源。事实上,用户的状态信息相对于频谱信息更多地反映了用户本身的行为规律。对于多状态的识别、学习和智能理解将是一种优于频谱感知的认知方式。传统的频谱感知仅在 $\{0,1\}$ 二元假设下对用户频谱的占用进行判决。然而实际用户传输的状态可以被描述为集合 $\{S_1, \dots, S_M\}$ 。因此可以基于有限长度的接收序列 $\{d_1, \dots, d_N\}$,利用多元假设检测构造最大后验概率 $Pr\{S_m|d_1, \dots, d_N\}$,以此判断用户的最大可能状态。在此基础上,可以利用概率统计的知识求解状态错判概率 $Pr\{S_m|S_n\}$,由此设计性能折中的资源调度或资源分配算法。然而,完全判断用户的传输状态并针对每一种状态设计一种策略的思路,将带来很高的复杂度。

在大多数情况下,可以考虑将“相似”的用户状态集合聚类在一起,相似度可以根据实际传输需求以及传输策略进行具体定义,采用模式识别中的聚类算法将用户的各种状态分成形如 $\{\{S_1\}, \{S_2, S_3\}, \dots, \{S_{M-1}, S_{M-2}, S_M\}\}$ 的聚类形式,并利用模式识别技巧在接收序列 $\{d_1, \dots, d_N\}$ 的条件下对用户的状态类别进行判断。在识别了用户传输状态后,可采用机器学习或增强型学习等方式对用户的深层行为进行研究,掌握用户行为规律,分析用户行为模式,最后利用数据挖掘技巧对用户的未来行为进行预测,以设计相应的资源调度算法,提高用户体验。

可以看到,上述多情境智能认知方法能够很好地服务于“可控自治”的顶层设计思路,通过智能识别、学习和推断,提升全局控制平面的信息精确性和局部自治模块的信息全面性,进而服务于密集立体覆盖中的智能协同。

6 结束语

在城市立体化、用户密集化、业务海量化的趋势下,如何在点到点传输逐渐逼近香农极限的情况下,进一步提升单位面积的频谱效率,是无线与移动通信领域亟待解决的重要问题。本文分析了这种趋势下一种可有效提升频谱效率的全新的网络模式和架构——密集立体覆盖,该架构可依托于城市形态进行“物理”和“逻辑”立体组网,从而利用平面之外的第 3 个维度复用频谱。由于密集立体覆盖移动通信高度依赖城市建筑形态,因此会衍生出多层次、多体制异构重叠覆盖的组网形式,为了灵活地优化系统的复杂

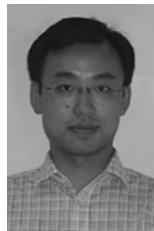
性和通信性能,提出了一种全新管理、控制和优化思路——“可控自治”,并给出了基于“受控博弈,有序竞争”的通用数学框架;论述了密集立体覆盖中大规模立体天线协同的优势、挑战和技术难点;提出了基于模式识别、机器学习和人工智能的多情境认知的认知理论与技术,使密集立体覆盖成为传统认知无线网络演进的全新应用场景和学科交叉生长点。

密集立体覆盖为移动通信向着5G的发展和演进提供了一种全新的解决思路 and 方向。其相关研究尚处于起步阶段,存在大量的科学问题和创新空间,其研究涉及无线通信与多学科,包括博弈论、模式识别、人工智能、数值计算乃至地理信息系统等。对密集立体覆盖移动通信基础理论与关键技术的深入研究,必将推动大容量、多制式、智能化宽带移动通信网络的源头创新,为未来宽带无线城市的建设提供信息基础设施关键技术。

参考文献

- 1 Tse D, Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press, 2005
- 2 Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201~220
- 3 Zhou S, Gong J, Yang Z, *et al.* Green mobile access network with dynamic base station energy saving. ACM MobiCom, 2009, 9(262): 10~12
- 4 Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388~404
- 5 Andrews J, Shakkottai S, Heath R, *et al.* Rethinking information theory for mobile Ad Hoc networks. Communications Magazine, IEEE, 2008, 46(12): 94~101
- 6 Franceschetti M, Migliore M D, Minero P. The capacity of wireless networks: information-theoretic and physical limits. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(8): 3413~3424
- 7 Gupta P, Kumar P R. Internets in the sky: capacity of 3D wireless networks. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, IEEE, 2000(3): 2290~2295
- 8 Li P, Pan M, Fang Y. The capacity of three-dimensional wireless Ad Hoc networks. INFOCOM, Shanghai, China, 2011: 1485~1493
- 9 Peng M, Liang D, Wei Y, *et al.* Self-configuration and self-optimization in LTE-Advanced heterogeneous networks. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5): 36~45
- 10 Goldsmith A J, Varaiya P P. Capacity of fading channels with channel side information. IEEE Transactions on Information Theory, 1997, 43(6): 1986~1992
- 11 Wang J H, Scutari G, Palomar D P. Robust MIMO cognitive radio via game theory. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(3): 1183~1201
- 12 Scutari G, Palomar D P, Pang J S, *et al.* Convex optimization, game theory, and variational inequality theory. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 35~49
- 13 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590~3600
- 14 Rusek F, Persson D, Lau B K, *et al.* Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40~60
- 15 Love D J, Heath R W, Santipach W, *et al.* What is the value of limited feedback for MIMO channels. Communications Magazine, IEEE, 2004, 42(10): 54~59
- 16 Stankovic V, Haardt M. Generalized design of multi-user MIMO precoding matrices. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(3): 953~961
- 17 He A, Bae K K, Newman T R, *et al.* A survey of artificial intelligence for cognitive radios. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1578~1592

[作者简介]



陈巍,男,清华大学电子工程系教授、博士生导师,通信研究所副所长,主要研究方向为无线通信与网络、信息论。

王东明,男,东南大学副教授,主要研究方向为空时无线通信中的传输理论与技术。

王家恒,男,东南大学副教授,主要研究方向为通信和信号处理系统的设计和优化。

高飞飞,男,清华大学自动化系副教授,主要研究方向为信号处理、模式识别、机器学习。

彭木根,男,北京邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为时分双工(TDD)无线网络信息理论、协同网络编码、无线网络自组织技术。

(收稿日期:2013-05-20)