

超高密度无线网络的自组织技术

李建东, 滕伟, 盛敏, 徐超

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 网络密集化是应对未来 5G 无线网络容量提升 1 000 倍挑战的主要手段之一, 且超高密度网络中单节点要配置和优化的参数超过 2 000 个, 因此, 只有通过新一代自组织技术来感知网络运行的态势, 自主发现和调配网络资源来精准匹配网络中的业务流, 才能有效提高网络的承载能力。分析了超高密度网络自组织技术面临的挑战和呈现的新属性, 给出了超高密度网络中自组织技术的 2 个典型用例, 展望了超高密度无线网络中自组织技术的发展前景和方向。

关键词: 超密无线网络; 自组织技术; 可密集性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Self-organizing techniques in ultra-dense wireless network

LI Jian-dong, TENG Wei, SHENG Min, XU Chao

(State Key Lab of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Network densification was one of the main ways to deal with the challenge of supporting 1 000 times higher capacity in 5G networks. Wherein, a single node needs to configure and optimize more than 2 000 parameters. Therefore, novel self-organizing network (SON) would be the inevitable technique for wireless networking, where decision makers were enabled with the ability of perceiving the dynamic network situation and meanwhile, autonomously discovering as well as configuring network resources. With the aid of this promising technique, users' demands and network resources could be well matched and furthermore, the capacity of networks could be significantly improved. The trend of dense development in wireless communications was discussed. Then, the potential challenges and required new properties was analyzed when utilizing SON in ultra-dense wireless networks. Meanwhile, two typical use cases were depicted. Finally, for future ultra-densely deployed wireless networks, the possible development prospect and direction of SON were briefly presented.

Key words: ultra-dense wireless network, self-organizing technique, densability

1 引言

网络密集化作为应对未来 5G 无线网络容量提升 1 000 倍挑战^[1]的主要手段之一, 已经得到了产业界和学术界的广泛认可^[2,3]。未来 5G 网络需要支持几十 $\text{Tbit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ 的业务密度、大于每平方公里百万个的连接密度。网络密集化主要是通过密集布设微蜂窝/微微蜂窝/家庭基站^[4], 拉近用户与各类基

站之间的距离, 从而实现提升频谱资源的空间复用率、保证用户体验, 达到提高网络容量等目标。

在网络密集化过程中, 基站数目将不断增加, 其数量和用户设备数目具有相同数量级^[5], 密集化带来的主要问题有如下方面。

1) 网络需管理和配置的参数大幅增长。例如: 在 2G 网络中, 单节点需要配置和优化的参数大约为 500 个; 3G 网络需要配置和优化的参数达 1 000 个;

收稿日期: 2016-05-06; 修回日期: 2016-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61231008); 111 基地专项基金资助项目(No.B08038); 国家科技重大专项基金资助项目(No.2015ZX03004004); 中国博士后科学基金资助项目(No.2015M582614); 西安电子科技大学基本科研业务费基金资助项目(No.XJS15048, No.JB160107)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61231008), 111 Project (No.B08038), The National S&T Major Project (No.2015ZX03004004), China Postdoctoral Science Foundation (No.2015M582614), The Basic Research Fund in Xidian University (No.XJS15048, No.JB160107)

4G 则有 1 500 个参数。而在下一代网络中，单节点可能需要配置和优化达 2 000 个参数^[6]。这将导致网络的操作复杂度和运营成本提升 60 倍左右。因此，随着网络的密集化，如何快速、高效地配置和优化网络参数显得越来越重要。

2) 密集非规则布设的微小基站（指微蜂窝基站/微微蜂窝基站/家庭基站的统称）间的干扰管控复杂。在传统的 2G/3G 蜂窝网络中，主要通过预先规划来布设宏蜂窝和微蜂窝基站，从而系统中的干扰得到很好的控制。而在 4G/未来的 5G 网络中，由于微小基站的自主和随机布设，导致整个网络中微小基站是大规模非规则设置的，从而导致同层蜂窝小区之间以及不同层蜂窝小区之间的相互干扰。另外，在超密布设微小基站的情况下，由于传输距离的减少，无线电波从远场传播模型向近场传播模型过渡，将导致网络干扰和拓扑变化更为剧烈^[7,8]。

3) 回程资源严重受限。出于成本和可操作性的考虑，大量微小基站通过数字用户线路（DSL, digital subscriber line）或者无线链路接入核心网，这将导致微小基站的回程传输容量的限制变得更加明显^[9]。

4) 信道间的相关性增强，可用分集增益减少。基站的密集化布设可以拉近基站与用户间距离，此时，无线信号将从非视距（NLoS, non-line-of-sight）传输向视距（LoS, line-of-sight）传输转变^[10]，这导致信道的分集增益减少。

5) 用户行为的相关性增强。随着小区覆盖范围的缩小，用户间的相对距离变小，使用户之间的行为（业务请求、移动轨迹等）具有相关性。例如，在传统的宏蜂窝小区中，小区的覆盖范围达到几千米，用户不仅数量较多而且类型（教师、学生、工人、上班族等）复杂，这种差异性导致用户间行为相互独立。然而在超密集网络中，小区内用户类型较为单一（比如都是一个办公室的员工），显然这些用户的相关程度很高。

面对上述挑战，为了充分发掘超密集无线网络所具备的潜在优势，需要研究如何在减少人工参与的同时，实现资源的按需、自主配置。新一代自组织技术由于能够感知网络态势信息（网络资源的分布和状态、干扰的特征和分布）及其变化，通过自主发现和调配网络资源来精准匹配网络中的业务流，倍增无线通信网络的整体效能，提高网络的承载能力（容量），成为了使网络能够密集化发展的

重要手段。

本文重点研究了超高密度无线网络中的自组织技术。首先，本文介绍了自组织网络的概念及框架，并分析了在超高密度无线网络中运用自组织技术存在的问题。然后，本文完备并发现了超高密度无线网络中的自组织技术的特征属性，给出了超密集无线网络中自组织技术的 2 种典型用例，进而揭示了在超高密度无线网络中自组织技术可有效减少系统干扰，提升网络容量，适应网络的密集化发展。最后，本文旨在给大家提供一种启示性研究思路，使该技术在未来超密网络中得到广泛关注。

2 超高密度无线网络中自组织技术的挑战及实现架构

自组织网络技术（SON, self-organizing network）是指自身能够主动感知周围环境变化，并做出自主决策的技术^[11]，其概念最早出现在仿生学研究中。利用该技术，网络能够学习外部环境，通过自主决策适应环境的动态变化。由于自组织技术具备的优越性，目前已被广泛用于无线传感器网络^[12]、ad hoc 网络^[13]和计算机网络^[14]。随着移动蜂窝网络的不断发展，其网络部署和维护的成本越来越高，网络资源管理和控制越来越复杂。因此，自组织技术同样被视为一种有效的手段，被引入到异构蜂窝网，并得到了快速的发展^[15]。为了在超密网络中应用自组织技术，高通公司专门开展了超密自组织技术（UltraSON）的研究^[16]。UltraSON 主要研究了在超密场景下自组织技术对移动性管理、功能控制和资源管控等方面的应用。Ali Imran 等^[17]也对下一代蜂窝网络中自组织技术进行了研究，其主要研究方向为网络性能的估计、参数的自配置以及天线倾角、方向角的优化。为了克服超密网络中人工诊断的困难，Raquel Barco 团队^[18-20]通过使用机器学习和大数据等方法实现了网络的自愈合功能。

传统的自组织网络技术主要包括自配置^[21]、自优化^[22]和自愈合^[23]，3 个层面的功能为：1) 自配置（self-configuration），即新加入的网络节点（如家庭基站）可以自动下载和安装软件以及配置网络参数，达到即插即用的效果，这样能够减少人工安装成本并且能够简化安装流程；2) 自优化（self-optimization），即在网络运行阶段，网络根据用户设备和基站的性能参数测量报告，自适应地调整网络参数，从而提高网络整体性能；3) 自愈合（self-healing），即当

发生或即将发生故障时,网络能够及时有效地通过参数优化或者重置部分参数来排除故障,恢复网络的正常运行。网络的自愈合功能可以加快发现和处理问题的速度,同时也可以避免人为排错所引发的非实时性以及潜在差错。

为了实现上述自组织网络的主要功能,自组织技术应具备如下 3 个特性^[24]: 1) 可扩展性,即随着网络规模的扩大,自组织技术的复杂度并不会无限增加,这就需要自组织技术在实施过程中仅需交互少量的局部信息且具有较低的实现复杂度; 2) 稳定性,即自组织技术能够在有限的、可接受的时间范围内从当前状态转移到所需状态,并且在该过程中避免振荡; 3) 敏捷性,也称为自适应,即要求自组织技术能对网络环境的变化及时地做出响应,但又不会反应过激(当网络环境变化很小时做出大幅度反应)。

2.1 超密无线网络中自组织技术的挑战

针对超密无线网络的主要问题,其自组织技术面临的第一个新挑战就是网络是否具有“可密集性”。所谓“可密集性”是指随着网络规模的不断增加(网络的面积不变,而单位面积里节点的密度不断增加),网络的容量随微小基站密度的增加而显著增加,且网络的控制开销不会更快增长而导致网络承载能力的恶化。

网络的超高密度发展,使无线通信场景从传统的远场通信向近场通信转变,完全可能颠覆现有在远场传播条件下得到的关于无线网络性能,尤其是网络容量的各种结论。因此,具备“可扩展性和可密集性”等特征的新一代自组织技术,能够感知网络态势信息(网络资源的分布和状态、干扰的特征和分布)及其变化,通过自主发现和调配网络资源来精准匹配网络中的业务流,可倍增无线通信网络的整体效能,提高网络的承载能力(容量)。

针对超高密度异构网络环境,为了更好地利用自组织技术,迫切需要开展超高密度异构无线网络的自组织特性及机理研究,并探索超高密度异构无线网络的网络容量理论,提出逼近网络容量的自组织方法。未来的研究内容包括以下 2 个方面。

1) 超高密度异构无线网络的自组织特性及机理研究。研究网络密集化对超密环境下自组织方案的可扩展性、可密集性等的作用机理,从而指导逼近网络容量的自组织方案设计。研究自组织技术的“可密集性”的准确数学表征方法,构建评估超高

密度异构无线网络资源管控技术有效性的性能评估体系。

2) 逼近网络容量的自组织技术。重点突破满足自组织特性的资源管控技术。以干扰管理为例,由于干扰不同于噪声,其不仅携带了能量与信息,而且具有一定的结构和特征。因此,在超密集网络中,一方面需要研究已有的干扰管控技术的可行条件(即可适用的密度范围);另一方面,则需要充分利用干扰的特征及结构,设计新颖的干扰管控手段,提升网络容量。同时,还需要利用用户行为相关性和信道相关性,设计高效具有可扩展性、可密集性等的小区切换、负载均衡策略、移动性管理策略等自组织资源管控方法,逼近超密网络的容量界。

可密集性是网络超高密集化发展后,自组织技术呈现的新属性;同时为可扩展性、稳定性、敏捷性(自适应)等自组织技术增加了新的内涵。

从可扩展性来看,随着节点数量的激增,近域节点的决策对当前节点决策的影响将增强。如何有效控制这种相互影响性,并利用局部不完备的信息实现整个网络性能的优化,且确保在单位面积内节点的密度保持不变的情况下,网络控制开销不随系统规模的增加而无限度的增加,确保网络的服务能力,是面临的第二个挑战。

从稳定性来看,在超密网络中,节点数目的众多,一方面将导致网络整体业务状态的突发性明显增加,另一方面,由于用户的相关性增加,必然会导致业务变化具有较大的传递性。因此,如何避免由于局部业务的频繁变化而导致网络进入高度振荡,无法稳定的状态,是超密下自组织技术面临的第三个挑战。

从敏捷性上来看,由于网络状态复杂,管控参数量众多(单节点 2 000 个以上),一方面自组织技术要求能够对网络的变化迅速做出反应,一方面又要求自组织技术可以判断网络变化的不稳定性,能够前瞻式地预测网络环境的变化,避免做出不恰当的动作,导致网络振荡。因此,需要超密网络环境下,自组织技术要求能够更智慧地分辨网络的暂态变化。

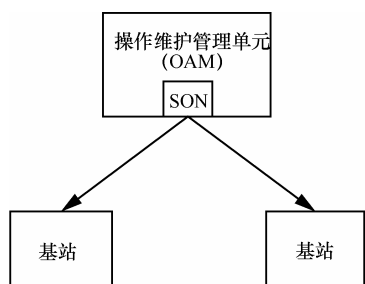
2.2 SON 的实现架构

目前,SON 的实现架构主要分为以下 3 种^[25]。

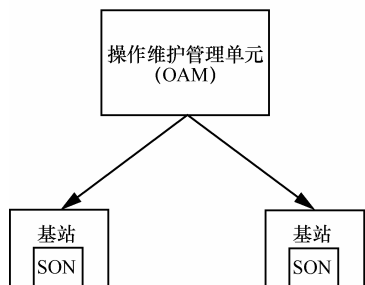
1) 集中式 SON

在集中式 SON 架构中,所有的功能实体位于操作维护管理(OAM, operation administration and

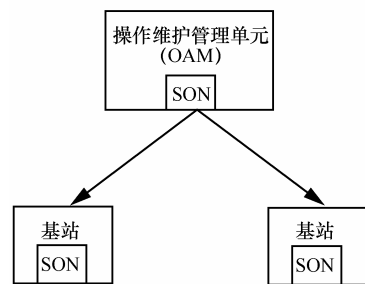
maintenance) 单元, 如图 1(a)所示。由于 OAM 位于网络的上层结构, 数量相对较少, 部署相对容易。显然, 传统基于中心管控的蜂窝网络是实现集中式自组织功能的一种可行架构。然而, 目前, 蜂窝网络中的管控技术通常需要引入人为干预, 不具备前文中所介绍的自组织功能特点。因此, 为了实现自组织功能, 需要网络中添加数据存储和计算模块来处理海量历史数据、挖掘有用信息, 通过对历史数据进行学习完成网络自主决策。因此, 海量数据的存储以及高效计算的实现是蜂窝网络中实现自组织技术的关键。



(a) 集中式架构



(b) 分布式架构



(c) 混合式架构

图 1 SON 的实现架构

2) 分布式 SON

在分布式 SON 体系架构中, 所有的功能实体都位于各个基站中 (也可以在终端节点里), 如图 1(b)所示。基于该架构能够很好地实现简单、快速的分布式自优化算法。但是, 随着网络的密集化, 部署开销将显著增加。如何通过局部的分布式决策来保

障网络整体性能, 是该架构下面临的重要问题。

3) 混合式 SON

在混合式 SON 中, SON 的一部分功能部署在 OAM 中, 一部分部署在基站 (或终端节点) 中, 如图 1(c)所示。这种架构综合了集中式和分布式这 2 种方式的优点。具体来说, 在基站侧主要部署简单、快速的自组织技术; 在 OAM 侧主要部署需要更多交互信息的、复杂的自组织技术。

上述 3 种体系架构各有利弊: 集中式 SON 的优点是能达到网络性能最优, 但方案实现起来比较复杂; 分布式 SON 的优点是能对外界环境做出快速反应, 可扩展性强, 但是由于缺少全局信息, 一般很难达到全局最优; 混合式 SON 结合了前两者的特点, 能够更好地适应不同的优化场景, 但不能完全克服中心节点遭到破坏时所带来的问题。因此, 在未来的超密集网络中, 需要根据具体目标需求来选择不同的体系架构。

3 超密集无线网络中的自组织技术典型用例

本文给出 2 个典型的自组织技术用例。在超密集无线网络中, 除了运营商规则布设的宏蜂窝基站, 存在大量随机布设的微蜂窝基站。因此, 微蜂窝小区中可能存在严重的层间干扰 (宏蜂窝小区和微蜂窝小区之间的干扰) 和层内干扰 (微蜂窝小区之间的干扰)。层间干扰可以通过正交信道布设机制彻底消除, 但是, 为了缓解层内干扰, 进一步提升网络容量, 本文需要研究微蜂窝网络中子信道分配技术。同时, 随着基站的密集化布设, 用户能够被更多的基站覆盖, 因此, 如何根据信道条件使用户能够快速高效地接入网络显得十分重要。

3.1 信道自配置技术

在无线网络中, 信道自配置技术具有重要作用。好的信道自配置技术, 可以使加入网络的节点设备根据网络环境, 自主选择工作频点, 从而缓解资源使用冲突、提升网络性能。未来超密无线网络中, 由于微蜂窝小区数目激增、空间分布具有强随机性以及回程链路容量受限, 集中式资源管控技术将无法适用。因此, 通过设计完全分布式的子信道分配机制, 缓解网络干扰、提升网络整体容量, 成为亟待解决的重要问题。本文在前期工作^[26]中将该问题建模为一个非合作速率最大化博弈模型, 并设计了一种完全分布式的子信道分配算法 (UDSAA,

utility-based distributed sub-channel allocation algorithm)^{注1}。当有新的微蜂窝基站加入网络时,该算法将被触发。该算法的主要思想是利用微蜂窝的传输容量来刻画微蜂窝基站所获得的效用,如式(1)所示,并在此基础上构造了非合作速率最大化博弈模型(NRMG, non-cooperative rate maximization game)。面对 NRMG 中纳什均衡存在性无法保证这一事实,通过在局中人(微蜂窝基站)的状态空间中引入一维新的变量描述其对探索新策略的渴望程度,设计了一种基于效用的学习模型,使所提出算法在给定条件下能够渐近收敛到一个帕累托有效解。在算法执行过程中,任意微蜂窝基站只需根据此时自身所获得效用以及所处状态,决定是否沿用当前策略(即所选择信道)。任意微蜂窝基站 $n \in \mathcal{N}$ 的效用函数定义如下

$$U_n((S_n)_{n \in \mathcal{N}}) = \sum_{k \in S_n} B_0 \text{lb} \left(1 + \frac{p_n^k g_{n,n}^k}{I_n^k(S_{-n}) + B_0 n_0} \right), \forall n \in \mathcal{N} \quad (1)$$

其中, $S_{-n} = (S_1, \dots, S_{n-1}, S_{n+1}, \dots, S_N)$ 表示微蜂窝基站 n 外其余基站所使用的策略情况, p_n^k 和 $g_{n,n}^k$ 分别表示基站 n 的发射功率和相应信道上的功率增益。此外, $I_n^k(S_{-n})$ 表示其他微蜂窝基站进行数据传输时对于基站 n 的累积干扰,可以通过测量周围环境获得。由式(1)可以看出,对于任意微蜂窝基站其效用即为可达传输容量。同时,利用该效用函数,在执行所提出基于效用的信道自配置算法 UDSAA 时,每个微蜂窝基站进行自主决策时只需要测量自身受到的干扰就可得到,无需引入基站间的信息交互,具备完全分布式的特点。

综上所述,该算法具备如下特点: 1) 由于执行算法时无需在不同微蜂窝小区之间引入信令交互,因此其更加适用于具有随机布设特性以及回程链路容量有限的密集微蜂窝网络; 2) 在给定条件下可以证明所提出算法可以渐近收敛到所研究问题的一个帕累托有效解; 3) 执行该算法时无需对所构造博弈模型中纳什均衡(NE, Nash equilibrium)的存在性提出严格要求,即该分布式算法即便在普适条件下依然能够较好地保障网络整体性能。

图 2 给出了不同算法下网络的平均信干噪比

随微蜂窝基站个数的变化关系。当网络中的微蜂窝基站数增加时,用户受到的干扰会增大,平均信噪比会降低。从图 2 可以看出,本文提出的 UDSAA 算法始终能为系统带来较高的平均信干噪比。而且,由于该算法只需要测量微蜂窝基站获得的外界干扰,不需要微蜂窝基站间进行信息交互,信噪比的变化对算法的影响不大。图 3 表示了网络容量随基站个数的变化关系。通过仿真结果可以看出,当给定区域(半径为 100 m 的圆形区域)中微蜂窝基站密度不断增大时,相比文献[27,28]中的算法,本文提出的算法 UDSAA 始终能为系统带来较高的网络容量。更为重要的是,UDSAA 算法具备 SON 技术所需的各种特性: 由于无需基站间进行信息交互,其具有很好的可扩展性; 由于能够在一定条件下达到帕累托有效解,其具备稳定性; 由于是完全分布式的,能够很快地对周围状态做出反应,其具有较好的敏捷性。

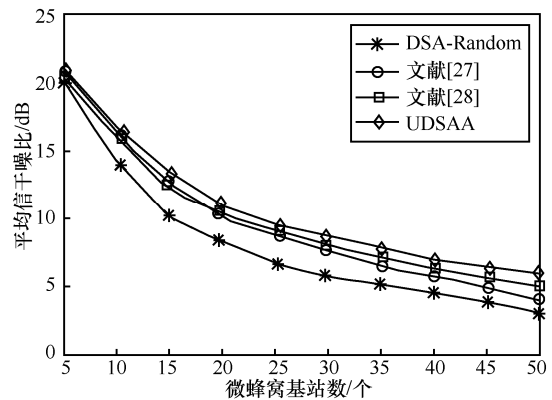


图 2 网络的平均信干噪比

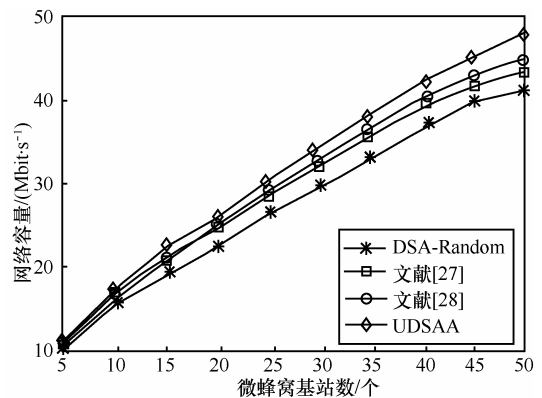


图 3 网络的整体容量

3.2 用户关联技术

用户关联技术会直接影响网络的资源分配方案,从而影响网络最终的性能。在超密集无线网络

注1: 作为本文的一部分,本节旨在通过简要介绍文献[26]中所提出的算法,揭示分布式自组织技术在超高密度无线网络干扰管控方面的有效性。

中，随着单位面积内基站和用户的数量增加，用户与基站之间的关联问题将变得更加复杂，因此，用户关联技术是超密集网络中自组织技术的一种典型用例。为了在降低实现复杂度的同时，保障关联策略的有效性和稳定性，李建东等^[29]参考 Gale 和 Shapley 的稳定婚姻策略设计了一种基于用户和基站双向匹配的分布式用户关联算法。算法具体实现步骤如下。

step1 测量基站 $m \in M$ 与其所属区域内用户 $n \in N$ 的距离，得到距离矩阵 $D = (d_{m,n})_{M \times N}$ 。根据距离的远近，基站 m 建立其关于周围用户的好列表 P_m ；同理，用户 n 根据距离矩阵建立其关于周围基站的好列表 \bar{P}_n 。

step2 若基站 m 关联的用户数未达到上限 N_{max} ，基站 m 将从其用户好列表 P_m 中选择还未被关联的用户进行关联请求。

step3 用户 n 从向其发送关联请求的基站和暂时已经关联的基站中，根据其好列表 \bar{P}_n ，选择其最喜爱的基站进行关联，并拒绝其他基站。

step4 当所有用户已成功关联基站或所有基站关联的用户数达到上限 N_{max} 时，算法结束，否则转到 step2。

需要指出的是，该算法可以在局部区域分布式执行、无需基站间进行信息交互，因此能够适用于基站和用户较多的超密集网络；另一方面，该算法可以打破关联顺序与网络性能之间的相互制约，实现用户与基站之间的最优匹配。然而，传统用户主导或者基站主导的关联机制并不具备这一特性。上述差别可以通过图 4 和图 5 展示。其中，图 4 给出了当用户 a 、 b 的关联顺序不同时，用户主导的关联算法执行结果；而图 5 给出了当用户 a 、 b 的关联顺序不同时，基站主导的关联算法执行结果。可以看到，不同的关联顺序将导致网络工作在不同的状态（虚线箭头所示为最优关联关系，而实线箭头为实际关联的情况）。然而，利用所提出双向匹配算法，能够始终获得最优的关联结果。

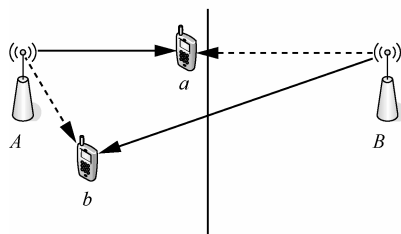


图 4 基于最近距离的用户关联基站结果示意

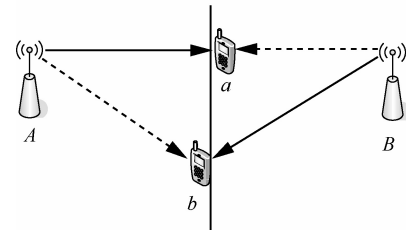


图 5 基于最近距离的基站关联用户结果示意

仿真结果如图 6 和图 7 所示。图 6 显示了双向匹配关联算法、最近距离用户关联基站算法和最近距离基站关联用户算法下的网络容量。利用所提出关联算法可以有效提升网络容量。图 7 展示了当基站和用户数目相等、基站服务用户限制不同时，算法迭代次数与网络规模之间的关系。根据仿真结果可以看出，算法所需的迭代次数（执行时间复杂度）并不会随着基站和用户数目的增加而呈线性增长，表明算法具有良好的可密集性，因此比较适用于超密集无线网络中。

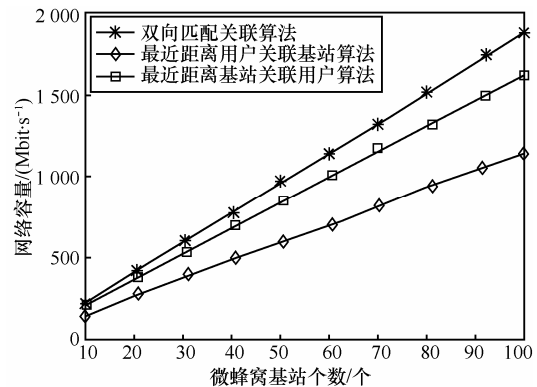


图 6 网络容量和微蜂窝基站个数关系

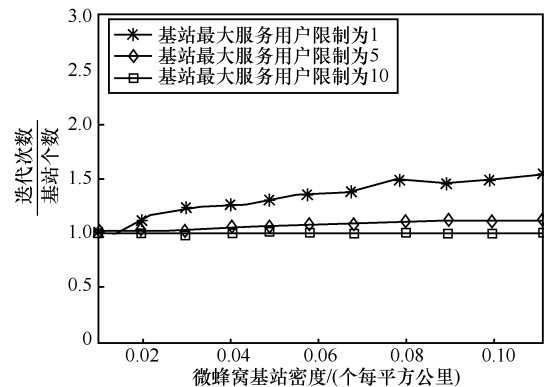


图 7 算法迭代次数与网络规模之间关系

随着网络的密集化发展，网络干扰复杂多变，因此研究高效的信道自配置技术从而有效地缓解层内干扰是一个亟待解决的问题。文献^[27,28]中，

微蜂窝基站需要通过其他微蜂窝基站到用户的信道状态信息来进行信道配置,因此会引入额外的信令交互。Lee 等^[30]利用图论的相关知识,通过构造网络干扰图提出了一种基于分组的资源分配机制,处理了微蜂窝网络的层内干扰问题。Liang 等^[31]利用类似思想,使用网络干扰图刻画了微蜂窝小区之间的彼此关系,提出了一种基于贪婪的资源分配方法。这 2 项工作需要引入一个中心控制实体对微蜂窝基站进行集中管理,引入大量的信令开销。相比之下,本文提出的 UDSAA 算法是完全分布式的,不需要基站间额外的信令开销。

在未来超密异构无线网络中,可供用户选择的基站类型丰富多样,而用户的接入策略直接影响到网络的资源分配。在现有系统中,基于用户信号接收功率的用户接入是最为常见的一种接入策略^[32]。与之相比,本文提出的双向匹配算法具有更大网络容量。对于用户关联的问题,已有一些关联策略的研究。文献[33]将用户关联问题建模成效用函数最大化问题,通过松弛将组合优化问题转化为凸优化进行求解。用户关联问题一般是一个组合优化问题,文献[34]提出利用贪婪算法求解组合优化问题的次优解,从而降低算法复杂度。文献[35]通过梯度下降算法和拉格朗日对偶的方法来间接得到最优的用户关联策略。在超密场景中,网络环境复杂多变,用户关联算法的收敛速度对网络性能的影响至关重要。而本文提出的双向匹配算法比上述 3 种用户关联算法的复杂度低,信令交互开销小,并且具有分布式的特点,因此能够更好地应用于超高密度无线网络中。

4 结束语

网络密集化是形势所趋,面对超密集无线网络中用户环境的多变性、网络的异构性以及用户相关性,真正地将自组织技术运用到超密集无线网络中仍存在问题。在超高密度无线网络中,自组织技术的可扩展性、稳定性、敏捷性(自适应性)有了新的内涵,同时自组织技术也呈现出可密集性的新属性。针对超密集异构无线网络中自组织技术具有的新内涵和新属性,本文迫切需要开展超高密度异构无线网络的自组织特性和机理研究,提出逼近网络容量的自组织方法。因此,关注超高密度异构无线网络的自组织特性,设计适用于超密网络的自组织技术,是未来 5G 网络的发展方向。

参考文献:

- [1] Qualcomm Incorporated (2013, 7). The 1 000x data challenge[EB/OL]. <http://www.qualcomm.com/1000x/>.
- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065-1082.
- [3] BHUSHAN N, LI J, MALLADI D. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2):82-89.
- [4] ANDREWS J G, CLAUSSEN H, DOHLER M, et al. Femtocells: past, present, and future[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3):497-508.
- [5] MOGENSEN P, PAJUKOSKI K, TIROLA E. Centimeter-wave concept for 5G ultra-dense small cells[C]//Vehicular Technology Conference (VTC Spring), c2014: 1-6.
- [6] IMRAN A, ZOHA A. Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 27-33.
- [7] LOPEZ-PEREZ D, DING M, CLAUSSEN H, et al. Towards 1Gbps/UE: understanding ultra dense small cell deployments[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorial, 2015: 1.
- [8] GOTSIS A, STEFANATOS S, ALEXIOU A. Ultra dense networks: the new wireless frontier for enabling 5G access[J]. Computer Science, 2015, 23(1): 72-79.
- [9] PENG H, XIAO Y, RUYUE Y N, et al. Ultra dense network: challenges, enabling technologies and new trends[J]. China Communications, 2016, 13(2): 30-40.
- [10] DING M, WANG P, LOPEZ-PEREZ, et al. Performance impact of NLoS and LoS transmissions in small cell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015.
- [11] EIGEN M, SCHUSTER P. A principle of natural self-organization[J]. Naturwissenschaften, 1977, 64(11): 541-565.
- [12] MILLS K L. A brief survey of self-organization in wireless sensor networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, 7(7): 823-834.
- [13] DRESSIER F. A study of self-organization mechanisms in ad hoc and sensor networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(13): 3018-3029.
- [14] DOBSON S, DENAZIS S, FERNANDEZ A, et al. A survey of autonomous communications[J]. ACM Transactions Autonomous Adaptive Systems, 2006, 1(2): 223-259.
- [15] JORGUSESKI L, PAIS A, GUNNARSSON F, et al. Self-organizing networks in 3GPP: standardization and future trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(12): 28-34.
- [16] Qualcomm Incorporated (2015, July). UltraSON: Self-organizing Small Cells[EB/OL]. <https://www.qualcomm.com/invention/research/projects/small-cells/ultrason>.
- [17] QSON(quality of service aware energy efficient self organizing future cellular networks)[EB/OL]. <http://qson.org>.
- [18] FORTES S, GARCIA A A, FERNANDEZ-LUQUE J A. Context-aware self-healing: user equipment as the main source of information for small-cell indoor networks[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(1): 76-85.
- [19] KHATIB E J, BARCO R, MUNOZ P, et al. Self-healing in mobile networks with big data[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(1): 114-120.

- [20] GOMEZ-ANDRADES A, MUNOZ P, SERRANO I. Automatic root cause analysis for LTE networks based on unsupervised techniques[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2369-2386.
- [21] HU H, ZHANG J, ZHENG X, et al. Self-configuration and self-optimization for LTE networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(2): 94-100.
- [22] BUVANESWARI A, DRABECK L, NITHI N. Self-optimization of LTE networks utilizing celnet explorer[J]. Bell Labs Technical Journal, 2010, 15(3): 99-117.
- [23] BARCO R, LAZARO P, MUNOZ P. A unified framework for self-healing in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(12): 134-142.
- [24] ALIU O G, IMRAN A, IMRANM A, et al. A survey of self organisation in future cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 336-361.
- [25] FENG S, SEIDEL E. Self-Organizing networks (SON) in 3GPP long term evolution[EB/OL]. <http://www.nomor.de/home/technology/white-papers/self-organizing-networks-in-long-term-evolution>.
- [26] XU C, SHENG M, WANG X J. Distributed subchannel allocation for interference mitigation in OFDMA femtocells: a utility-based learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2463-2475.
- [27] BUZZI S, COLAVOLPE G, SATURNINO D. Potential games for energy-efficient power control and subcarrier allocation in uplink multicell OFDMA systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2012, 6(2): 89-103.
- [28] LA Q D, CHEW Y H, SOONG B H. Performance analysis of downlink multi-cell OFDMA systems based on potential game[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(9): 3358-3367.
- [29] ROTH A, SOTOMAYOR M A O. Two-sided matching: a study in game-theoretic modeling and analysis[M]. New York, USA: Cambridge Press, 1992.
- [30] LEE H C, OH D C, LEE Y H. Mitigation of inter-femtocell interference with adaptive fractional frequency reuse[C]//IEEE ICC'10. c2010: 1-5.
- [31] LIANG Y S, CHUNG W H, NI G K. Resource allocation with interference avoidance in OFDMA femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(5):2243-2255.
- [32] DOCOMO N. Performance of eICIC with control channel coverage limitation[C]. 3GPP TSG RAN WG1 Meeting. c2010.
- [33] YE Q Y, RONG B Y, CHEN Y D, et al. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013,12(6): 2706-2716.
- [34] PRASAD N, ARSLAN M, RANGARAJAN S. Exploiting cell dormancy and load balancing in LTE HetNets: optimizing the proportional fairness utility[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10):3706-3722.
- [35] SHENK M, YU W. Downlink cell association optimization for heterogeneous networks via dual coordinate descent[C]//2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver, Canada, IEEE, c2013: 4779-4783.

作者简介:



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信(未来移动通信和未来无线局域网)、认知无线网络、大规模自组织网络、软件无线电以及无线网络的干扰管理等。



滕伟 (1993-), 男, 湖北江陵人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为异构无线网络中的自组织技术、机器学习和大数据在超密无线网络中的应用等。



盛敏 (1975-), 女, 湖南长沙人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为5G移动通信系统、异构网络融合以及无线网络自组织理论与方法等。



徐超 (1987-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学博士后, 主要研究方向为无线网络分布式资源管理、博弈理论以及分布式学习理论等。