

5G 超密集无线网络自组织技术

李建东, 盛敏, 刘俊宇, 赵晨曦, 张琰, 孙红光

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 极大增加无线网络密度, 有效提升无线网络容量是 5G 等未来移动无线网络的核心挑战之一。构建了适用于超密集无线网络的信道模型, 并通过干扰统计特性分析, 揭示了超密集组网技术提升网络容量的理论极限。为逼近该极限, 提出面向超密集无线网络的自组织技术, 并探究自组织技术在超密环境中的新属性, 最后设计并实现了基于自组织技术的小区融合分裂方法。实验测试结果表明, 该方法能够有效提高网络容量和用户体验。

关键词: 超密集无线网络; 自组织网络技术; 网络容量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00038

Self-organization networking technology for 5G ultra-dense wireless network

LI Jiandong, SHENG Min, LIU Junyu, ZHAO Chenxi, ZHANG Yan, SUN Hongguang

State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: Enhancing network capacity by increasing the density of the fifth-generation wireless networks has become one of the key challenges for the future mobile systems. A practical channel model for ultra-dense network (UDN) was built, and the limitation of network densification by analyzing the interference distribution was revealed. To approach the limit, UDN-oriented self-organization networking (SON) technology was proposed and its new feature in UDN was investigated. Finally, a SON based cell merging and splitting strategy was tailored. Experiment results indicate that the proposed strategy is capable for improving network capacity and user experience significantly.

Key words: ultra-dense wireless network, self-organization networking technology, network capacity

1 引言

随着信息化的不断深入, 越来越多的领域开始与移动通信系统结合, 催生了大量的移动业务需求, 并且这些需求保持着持续快速的增长。文献[1]中指出, 从 2010 年到 2020 年, 全球移动数据业务总量将增加 200~1 000 倍, 而到 2030 年, 业务总量比 2010 年将增长 20 000~100 000 倍。快速增长的移动业务需求对移动通信网络容量提出了更高的要求。提高网络容量的方法包括开放更多的频带资

源, 采用更高效的多址接入技术、调制技术、编码技术以及密集化组网技术等。虽然各种方法都能够有效提高网络的容量, 但是效果却不尽相同。从 1950 年到 2000 年, 通过开放更多的带宽资源使网络容量提升了 15 倍, 采用更先进的多址接入和调制技术使网络容量提升了 5 倍, 应用不同的编码技术同样使网络容量提升了 5 倍, 而密集化组网技术则使网络容量的提升达到了 2 700 倍。由此可见, 密集化组网技术是现有提升无线网络容量最有效的方案^[2,3]。

收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61231008, No.61725103, No.61701363); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2017M620439)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61231008, No.61725103, No.61701363), China Post Doctoral Science Foundation Project (No.2017M620439)

在地铁、大型体育馆、密集的住宅小区等场景，用户数量以及业务请求相当密集，会产生大量数据业务。例如，在地铁中，每平方米的通信链路数约为 6 个；在大型体育馆，每平方千米的通信链路数约为 1 000 000 个；而在密集的住宅小区，则要求无线网络的服务速度能够达到 Gbit/s 的量级。采用传统的网络结构已经很难满足如此巨大的业务量需求。为了满足如此高的业务需求，最根本的方法是增加小区的部署密度，减小小区半径及无线信号传播距离，提升无线网络空间资源的复用程度，进而提高网络的服务能力。例如，在 GSM 系统中，小区结构采用的是规则部署的宏蜂窝结构，小区半径一般为 1~2.5 km；而在 LTE 系统中，使用的则是规则部署的宏蜂窝和按需部署的微蜂窝异构融合架构，小区的半径一般在几十到几百米范围，小区的密度增加了数十倍，网络容量得到显著提升。

然而，超密集组网技术在减小信号传播距离、降低路径损耗、提升资源空分复用的同时，也造成了严重的资源使用冲突。一方面，当网络资源（时间/频率/空间）的复用程度过高时，用户间干扰将对信号的成功解调造成影响，降低数据传输速率；另一方面，随着收发设备（如基站和用户）距离的减小，无线信号由远距离传播逐渐过渡至近距离传播，近距离传播特性使信号功率随传播距离衰减缓慢，从而进一步恶化了近距离干扰。文献[4]的研究结果表明，当每个宏小区中微基站数目由 72 个增加至 144 个时，网络容量提升近 400 倍；然而，当微基站数目由 144 个增加至 216 个时，网络容量仅提升 250 倍。以上现象表明存在严重的无线网络干扰，致使通过密集化布设微基站带来的网络容量增益随着基站密度的增加不断降低。

针对上述问题，本文构建了超密集无线网络的信号传播模型，在该模型的基础上得到超密集无线网络中干扰的统计分布。随后，本文以空间吞吐量作为衡量网络容量的指标，对网络容量随基站密度变化的渐近规律进行刻画，并进一步分析了接收灵敏度、阴影衰落以及天线高度等重要参数对网络容量的影响。为缓解干扰对无线网络容量的影响，本文提出面向超密集无线网络的自组织技术，用以动态管理超密集无线网络中小区密度、网络结构等关键要素，并发掘了自组织技术在超密集无线网络中的新特征。最后，将所提方案在西安电子科技大学

体育馆部署的超密集无线网络中进行实现，用来指导小区分裂和小区聚合的动态实现。实验结果表明，自组织技术能够显著提升超密集无线网络的网络容量。

2 超密集无线网络容量研究

2.1 近距离传播的信道模型

相较传统网络来说，超密集无线网络最大的特点就是小区的高度密集化。而随着小区的密集化部署，用户与基站之间的通信距离（即信号传播距离）在不断减小，如表 1 所示。

表 1 蜂窝链路长度随基站密度变化情况

基站密度/ (个·平方千米 ⁻¹)	平均链路 长度/m	$P(d<50\text{ m})$	$P(d<10\text{ m})$	$P(d<1\text{ m})$
1	500	0.78%	0.03%	3.1×10^{-6}
100	50	54.4%	3.1%	0.03%
10 000	5	≈100%	95.7%	3.1%

在获得表 1 中数据时，蜂窝用户和基站采用最近关联策略。表 1 结果表明：当基站密度从 1 个/平方千米增加到 10 000 个/平方千米时，用户到基站的平均距离从 500 m 下降到了 5 m，用户在基站 50 m 以内的概率 P 从 0.78% 几乎增加到了 100%。由此可见，随着小区密度的不断增加，信号传播由远距离传播逐渐转变为近距离传播。由于信号近距离传播特性与传统远距离传播特性有所差异，因此，为研究超密集无线网络容量，首先需要对无线信号的近距离传播特性进行准确刻画和建模。

无界路径损耗模型（UPM, unbounded pathloss model）广泛应用于传统稀疏无线网络的路径损耗建模^[5-9]，即建模信号功率衰减随距离的变化情况。无界路径损耗模型的基本形式为 $d^{-\alpha}$ ，其中， d 表示无线信号传播距离， α 表示路径损耗因子。现有研究表明，无线信号在远距离范围内进行传播时，路径损耗引起的功率衰减与无线信号传播距离呈现负指数的变化趋势，因此，采用 UPM 对路径损耗进行建模能够准确体现上述特性。但是在超密集无线网络中，由于发送端和接收端的距离 d 变得很小，信号通常在近距离范围内传播，如果使用 UPM 对近距离传播信道的路径损耗进行建模，那么在 $d=0$ 处会出现一个奇点，即路径损耗趋近于无穷。除此之外，如果用 UPM 对信道进行分析，那么在 $d \in (0,1)$ m 时，接收端的信号强度会比发送端的信号强度还要高，

这显然与实际情况不符。

为准确刻画并建模无线信号在近距离范围的路径损耗情况，搭建如图 1 所示的实验平台。使用一台型号为 R&S SMW200A 的信号发生器连接一个全向天线作为发射端，并使用一台型号为 R&S FSW50 的频谱仪连接一个全向天线作为接收端，通过频谱仪测量得到不同信号传播距离情况下接收信号的功率值，并计算信道功率增益。在测量中，为匹配现行蜂窝网络及无线局域网常用频段，采用的信号载频频率分别为 0.88 GHz、2.4 GHz、2.6 GHz。

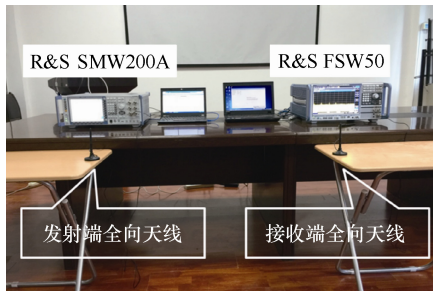


图 1 无线信号近距离传播特性测量实验

图 2 为使用上述实验平台测试得到的路径损耗随信号传输距离变化情况的示意。其中，用点形图标标注实际测量结果，用线形图标标注拟合结果。而呈直线的一组是 UPM 中路径损耗随传播距离的变化趋势。由图 2 可知，随着传播距离的减小，UPM 所刻画的路径损耗和实际测试结果差距不断增加。上述结果表明：考虑信号在近距离范围内（如 1 m 内）传播时，采用 UPM 对路径损耗进行建模与实际情况相差很大，这主要是因为 UPM 在近距离范围内对信号的增强作用所致。

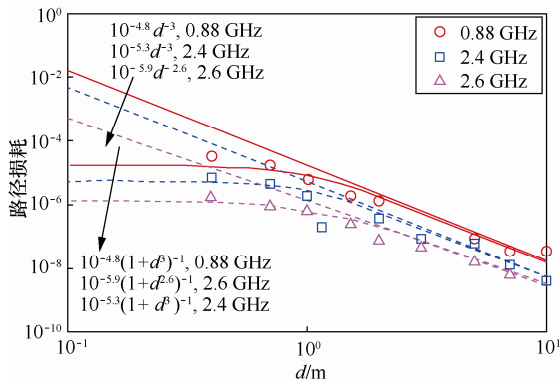


图 2 信号近距离传播测试结果

在对实验结果进行了一系列的拟合尝试之后，发现采用有界路径损耗模型（BPM, bounded

pathloss model）对信号在近距离区域的路径损耗进行建模较为准确。采用一种典型的 BPM，其基本形式为 $(1+d^\alpha)^{-1}$ 。图 2 中呈曲线的一组是 BPM 中路径损耗随距离的变化趋势。图 2 的结果表明，在近距离及远距离区域，通过 BPM 对信号功率衰减进行拟合的结果与实际情况都较为一致。因此，在超密集无线网络中，应采用 BPM 对无线信号的路径损耗进行建模。

经过上述测试分析，得到了信号在近距离区域传播时的信道路径损耗模型。对于不同的实际场景，需要采用不同形式的有界路径损耗模型来匹配不同的场景特性。对于网络部署较为稀疏的室外场景，如城市郊区，可以使用单斜率的 BPM 来刻画信号的传播模型，即在模型中只有一个路径损耗指数，如式(1)所示。

$$l_1^B(\alpha; d) = (1 + d^\alpha)^{-1}, d \geq 0 \quad (1)$$

对于网络部署密度较高的室外场景，如大型体育场，可以使用双斜率的 BPM 来刻画信号的传播模型，即在模型中有 2 个不同的路径损耗因子，分别对应于信号传播距离小于临界距离和大于临界距离的情况，如式(2)所示。

$$l_2^B(\{\alpha_n\}_{n=0}^1; d) = \begin{cases} (1 + d^{\alpha_0})^{-1}, & 0 \leq d \leq R_1 \\ \frac{1 + R_1^{\alpha_1}}{1 + R_1^{\alpha_0}} (1 + d^{\alpha_1})^{-1}, & d \geq R_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\alpha_0 \leq \alpha_1$ 。

对于网络密度很高的复杂室内场景，如会议室、办公区，就需要使用多斜率的 BPM 来刻画信号的传播模型，即在模型中出现多个路径损耗指数，根据不同的传播距离对应不同的路径损耗指数，如式(3)所示。

$$l_N^B(\{\alpha_n\}_{n=0}^{N-1}; d) = K_n (1 + d^{\alpha_n})^{-1}, R_n \leq \|d\| < R_{n+1} \quad (3)$$

其中， $\alpha_i \leq \alpha_{i+1}$ ，定义 $K_n = \prod_{i=1}^n \frac{1 + R_i^{\alpha_i}}{1 + R_i^{\alpha_{i-1}}}$ ，以保证式(3)的连续性。

需要指出的是，式(2)和式(3)是由式(1)推导演进而来，重点用于刻画不同传播范围内路径损耗随距离衰减速度的差异性。例如，采用式(2)中的双斜率模型，在临界距离内，由于直射（LoS, line-of-sight）路径的存在，路径损耗导致的信号衰减程度随传播距离增加并不强烈；而在临界距离以

外, 由于信号收发端之间多为非直射 (NLoS, non-line-of-sight) 路径, 因此, 信号随传播距离增加衰减强烈, 即路径损耗因子满足 $\alpha_0 \leq \alpha_1$ 。

2.2 超密集无线网络中的干扰

在超密集无线网络中, 信号发送端和接收端的距离很小, 信号在近距离区域传播的概率大大增加。根据 BPM 的特点, 在近距离传播时, 信号强度随距离的衰减会很慢, 不同基站之间在近距离区域的干扰会更严重, 所以近距离区域的干扰和远距离区域的干扰特征差异很大。为了更好地分析信号在稀疏网络和密集网络中干扰的差异, 本文对单斜率 UPM 和双斜率 BPM 这 2 种模型分别在稀疏和密集这 2 种情况下的信号干扰分布进行仿真, 结果如图 3 所示。

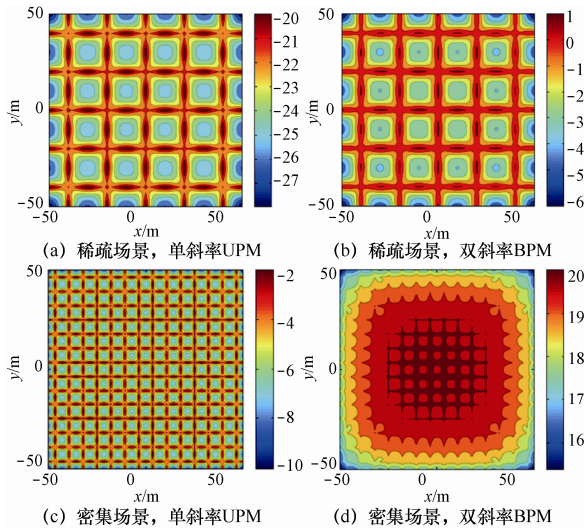


图 3 稀疏和密集部署网络采用不同路径损耗模型干扰分布仿真

在仿真中, 基站都是呈正方形网格状布设, 稀疏网络中基站的布设间隔为 20 m, 密集网络中基站的布设间隔是 7 m。干扰的强度用不同的颜色表示, 从蓝色到红色表示干扰的强度逐渐增强。实际系统中, 在网络中业务负载分布均匀的情况下, 为保证更佳的服务体验, 用户更倾向于与其距离最近基站相关联。因此, 在仿真中假设用户与距离最近的基站进行关联。

图 3(a)和图 3(c)是单斜率 UPM 在稀疏和密集这 2 种情况下干扰强度的仿真结果, 图 3(b)和图 3(d)是双斜率 BPM 在稀疏和密集这 2 种情况下干扰强度的仿真结果。从图 3 中可以看出, 在稀疏网络中, 2 种模型中的干扰分布是相似的。这是由于在基站密度较小时, 大部分蜂窝链接都处于远距离区域

内, 只有很少的链接处于近距离区域, 因此, 用 UPM 和 BPM 对路径损耗建模的区别不是很大。对比图 3(a)和图 3(c)能够看出, 在用 UPM 对路径损耗建模时, 干扰在稀疏网络和密集网络中的强度分布基本是没有差别的。但是从图 3(b)和图 3(d)中可以很明显地看出, 在使用 BPM 对路径损耗进行建模时, 干扰在稀疏网络和密集网络中的强度分布是完全不同的, 这是由于 BPM 中, 在近距离区域信号随距离的衰减很慢, 所以造成的干扰强度更高一些。因此, 相对于稀疏网络来说, 密集网络中干扰的强度更高, 分布更加复杂, 对于分析网络容量造成的困难也更大。

2.3 超密集无线网络容量研究

由于超密集无线网络与传统稀疏网络相比在结构上发生了较大的变化, 所以采用传统的评价标准就很难准确地对其网络容量进行衡量。因此, 本文提出使用空间吞吐量 (ST, spatial throughput) 作为评价超密集无线网络容量的指标。空间吞吐量表示在每平方米区域内, 使用单位频谱资源所承载的数据传输速率, 定义为

$$ST = \mu \Pr(SINR > \tau) \text{lb}(1 + \tau) \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{m}^2) \quad (4)$$

其中, μ 代表被激活链路的密度, $SINR$ 表示在接收端的信噪比, τ 表示接收端的 $SINR$ 门限值, 所以 $\Pr(SINR > \tau)$ 表示接收端成功接收的概率。用户密度的增高会导致 μ 的增加, 同时也会造成 $\Pr(SINR > \tau)$ 的减小。

为了进一步说明 UPM 对超密集无线网络路径损耗的刻画是不准确的, 采用空间吞吐量作为超密集无线网络的网络容量评价标准, 对 UPM 和 BPM 这 2 种模型的网络性能做出评价, 仿真结果如图 4 所示。

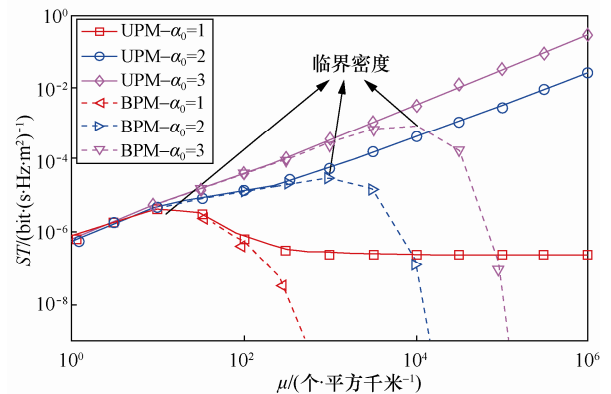


图 4 空间吞吐量随基站密度变化

从图 4 可以看出,采用 UPM 对路径损耗进行建模时,网络空间吞吐量会随着基站密度的增加呈现出线性或近似线性增加的情况;然而,采用 BPM 对路径损耗进行建模时,网络空间吞吐量随基站密度的增加呈现先增后减,甚至趋近于 0 的变化趋势。显然,采用 UPM 对路径损耗进行建模时,网络的空间吞吐量被严重高估。根据上述结果,可将网络空间吞吐量渐近趋势发生转变的基站密度定义为临界密度,当基站实际部署密度大于该临界密度时,网络容量将随基站部署密度的增加而始终减小。因此,临界密度的获得将为无线网络的部署提供指导。同时,为增加超密集组网技术的可行范围、扩大网络容量,需要提高临界密度。接下来考虑下行蜂窝网络,对影响网络临界密度的系统参数进行研究。

首先,研究接收端 SINR 的门限值 τ 对临界密度的影响。在接收端, τ 值越大则要求干扰越小,发送成功的概率也就会随之变小,进而影响网络的空间吞吐量。图 5 为当 τ 值分别为 0 dB、10 dB、20 dB 时,无线网络的空间吞吐量随着网络密度的变化曲线。

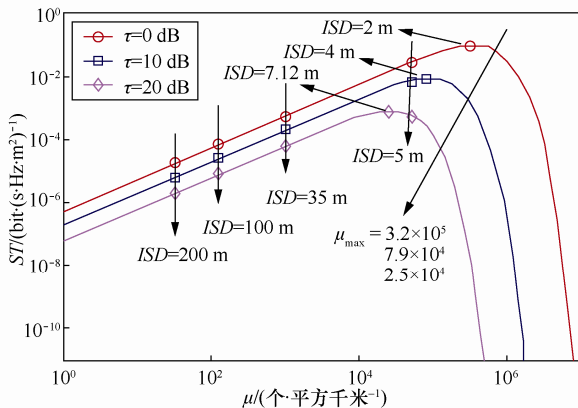


图 5 不同 τ 值对应的空间吞吐量变化曲线

图 5 结果表明,在相同基站密度情况下, τ 值越小,网络的空间吞吐量越大。 τ 值越小,网络空间吞吐量达到最大值对应的基站临界密度越大。 τ 值分别为 0 dB、10 dB、20 dB 时,网络空间吞吐量最大值对应的基站部署密度为 3.2×10^5 个/平方千米、 7.9×10^4 个/平方千米和 2.5×10^4 个/平方千米,此时站间距离 (ISD, inter site distance) 分别为 2 m、4 m 和 7.12 m。在 $\tau = 10$ dB 时, ISD 从 200 m 减小到 100 m、35 m、5 m 和 4 m,网络空间吞吐量由 7.52×10^{-6} bit/(s·Hz·m²) 增加到 3.0×10^{-5} bit/(s·Hz·m²)、 2.4×10^{-4} bit/(s·Hz·m²)、 8.5×10^{-3} bit/(s·Hz·m²) 和 9.8×10^{-1} bit/(s·Hz·m²),分别增加了 4 倍、32 倍、1 131 倍

和 1 303 倍。

接下来,将研究无线信道阴影衰落对临界密度的影响。阴影衰落会直接造成接收端接收到的信号减弱,影响 SINR,进而影响空间吞吐量。图 6 表示无线信道阴影衰落为 4 dB、8 dB 和 12 dB 时空间吞吐量随基站部署密度的变化情况。

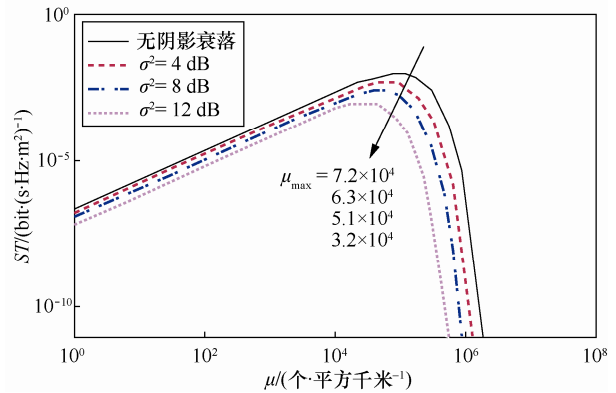


图 6 不同阴影衰落下空间吞吐量的变化曲线

图 6 结果表明,传播信道的阴影衰落越大,相同网络密度情况下网络空间吞吐量就越小,网络的临界密度也越小。以阴影衰落为 8 dB,接收端 SINR 门限 $\tau = 10$ dB 为例,当 ISD 从 200 m 减小到 100 m、35 m 和 5 m (临界密度) 时,通过网络密集化获得的网络空间吞吐量由 6.3×10^{-6} bit/(s·Hz·m²) 分别增加到 2.5×10^{-5} bit/(s·Hz·m²)、 2.0×10^{-4} bit/(s·Hz·m²) 和 4.5×10^{-4} bit/(s·Hz·m²),增益分别为 4 倍、32 倍和 722 倍。

最后,研究信号收发端天线高度差对临界密度的影响。在无线网络系统中,收发两端的的天线高度差越大,接收端接收的信号强度越弱,影响 SINR,进而影响网络容量。图 7 为收发两端天线高度差 Δh 分别为 0.5 m、1 m 和 2 m 时,空间吞吐量随网络密度的变化曲线。

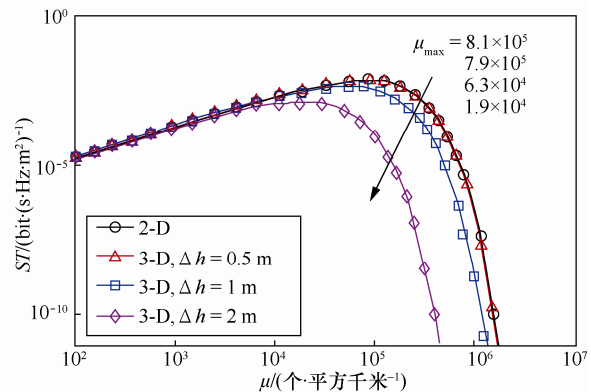


图 7 不同天线高度差下空间吞吐量的变化曲线

通过仿真发现，无线信道收发两端天线的高度差越大，相同网络密度下网络的空间吞吐量就越小，网络的临界密度也越小。以高度差为1 m，接收端 SINR 门限 $\tau=10$ dB 为例，当 ISD 从 200 m 减小到 100 m、35 m、5 m 和 4.5 m（临界密度）时，网络空间吞吐量由 6.56×10^{-6} bit/(s·Hz·m²) 分别增加到 2.6×10^{-5} bit/(s·Hz·m²)、 2.4×10^{-4} bit/(s·Hz·m²)、 4.6×10^{-3} bit/(s·Hz·m²) 和 4.7×10^{-3} bit/(s·Hz·m²)，增益分别为 4 倍、33 倍、698 倍和 714 倍。

通过上述分析可以发现，用网络密集化的方法来提高网络容量是有上限的，虽然可以通过调整一些系统参数来提高网络容量的上限，但这并不是提高网络容量的根本方法。那么，需要考虑采取什么方法可以从根本上对超密集无线网络的网络容量进行改善。

3 自组织技术在超密集无线网络的应用

在第2节对超密集无线网络的网络容量进行仿真测试，发现通过超密集组网技术来提高网络容量具有局限性：当基站部署密度达到临界密度后，如果继续增加基站密度，网络容量就会迅速下降。为进一步提高超密集无线网络中网络容量，本文提出将自组织网络（SON, self-organizing networking）技术运用到超密集无线网络中。

3.1 应用自组织技术的必要性

随着现代社会对移动互联网需求的不断增加，无线网络的规模越来越大，网络结构越来越复杂。在这种高复杂度的网络环境下，人工规划、配置、优化一个网络的所有相关网络参数并不实际。鉴于此，自组织技术对于现代通信网络来说是非常重要的。具体而言，采用自组织技术，前期若能掌握一些网络相关的数据参数，就能够使网络呈现出一些自主的行为。当前期只有少量的数据时，网络能够进行自配置；当数据量更多时，网络能够拥有一定程度的自组织性和自愈性；当拥有大量的数据时，网络甚至会拥有一定的自进化特性^[10]。

由于网络规模的扩大，网络中节点数量也越来越多，相应地，网络中参数的数量也呈指数增长。图8为无线网络变迁过程中，网络参数和节点数量的变化示意。可以看出，在5G移动通信系统中，每个网络节点需要配置的系统参数接近2000个，是4G移动通信系统中每个网络节点需要配置系统参数数量的1.3倍，因此，在5G移动通信系统中，

自组织技术是必不可少的。下面对自组织技术的主要功能和要求进行研究和分析。

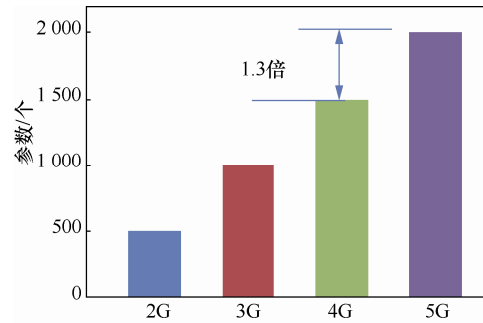


图8 网络参数和节点数量变化示意

3.2 传统的自组织技术主要功能

3.2.1 可扩展性

由于蜂窝网络的网络规模逐渐扩大、网络不规则部署现象越来越严重，可扩展性成为自组织的一个重要的特点，文献[11, 12]提出自组织技术的可扩展性即自组织解决方案满足低复杂度及信息交互量低的要求。

虽然随着芯片和计算机构架技术的进步，计算机系统的处理能力越来越强，但是在现代无线网络中，用户的数目越来越多，通信业务量的要求越来越高，方案的算法复杂度也会越来越高。如果方案的复杂度较高，那么随着网络规模的扩大，整个算法的计算量会相当大，使网络无法正常高效运转。因此，低复杂度的要求使自组织技术能够有效地应用于网络规模快速扩大、网络复杂度越来越高的无线蜂窝网络，也就是说自组织网络中各种协议、算法的计算量不能随着网络规模的扩大、节点数量的增加而无限增加。

同时，由于基站之间需要相互确定彼此的状态信息以及传递一些资源占用情况信息，而且这些交互信息的开销是随着网络规模的扩大而增加的。如果信息交互量较大，随着网络节点数量的增加，交互控制信息占用的资源量会越来越大，从而直接影响到正常数据业务的传递。而由于用户对业务的时延要求，使网络的开销不能无限增大，所以要求自组织网络算法的信息交互量较少。

3.2.2 稳定性

稳定性要求自组织技术的解决方案必须使系统的状态在有限个状态之间跳转，即使由于某些预定之外的影响作用于系统，使系统跳转到一个未知的状态，也必须在有限的周期内回到正常的状态。

现代无线蜂窝网络规模越来越大,网络节点之间的耦合度也越来越高,当一个节点出现问题时,可能会波及很多的网络节点,使网络性能退化甚至导致网络崩溃。对于分布式结构的网络,虽然各个网络节点的地位是相同的,但是由于网络拓扑和负载分布等原因,会有一些节点在网络中的重要性更高,如果这些网络节点出现问题,会直接导致网络的性能大幅度下降。对于中心式结构的网络,当非中心节点出现问题时,会由于节点本身重要性不同对网络状态产生不同的影响,影响网络的性能;当中心节点出现问题时,如果不能在短时间内恢复,则会直接导致整个网络的瘫痪。因此,在大规模的无线蜂窝网络中,自组织技术的解决方案对网络节点稳定性的要求就显得至关重要。

3.2.3 敏捷性

自组织技术的敏捷性是指算法能够根据网络的变化迅速做出响应,来调整网络的系统参数,使网络能够适应新的应用环境。

一个自组织网络的算法具有可扩展性和稳定性,能够完成基本的功能,但是并不能够算是一个高效的自组织算法。虽然大部分网络的基本结构是相似的,但是每个网络都是有适应其应用场合的特性的,能够完成基本功能的自组织算法并不一定能够适配每个网络,尽可能发掘网络的潜力。一个高效的自组织算法需要能够根据网络在运行中获得的测量值,了解当前网络环境的变化,根据网络设备运行的状态,快速地调整网络运行参数,挖掘网络在当前环境下能够发挥出的最大潜力,使系统有对网络动态变化探索的能力,从而优化网络的性能,提高用户的体验。因此,自组织技术的解决方案对敏捷性的要求是网络具有适配性、充分发掘网络潜力所必需的。

3.3 可密集性—超密集无线网络中自组织技术的新特征

在超密集无线网络中,网络节点的密度远高于传统的无线蜂窝网络。由于网络结构的改变使网络的特性发生了变化,密集化成为影响网络性能的重要因素。所以,将自组织技术用于超密集无线网络中时,需要拥有新的功能才能适应新的网络特性,提高网络性能。由于超密集无线网络的节点密集程度很高,所以在设计自组织技术的算法时,需要考虑如何减少网络密度增加对算法复杂度的影响,本文定义这种功能为自组织技术的可密集性。可密集

性是指自组织技术算法的复杂度不会随着网络的密度增加而无限的增加。

自组织技术的可密集性不同于可扩展性。可扩展性一般是指网络的范围在不断地扩大,但密度并没有明显增加,还是维持在一个较为稀疏的水平上;而可密集性则是指网络的范围可能并没有发生很大的改变,但是网络的密度却发生了巨大的变化,由稀疏网络变为了超密集无线网络。图 9 为可扩展性和可密集性的区别。

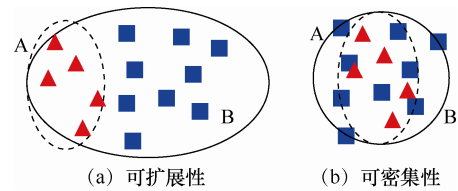


图 9 自组织技术功能应用场景示意

图 9(a)为自组织技术可扩展性应用的场景,虚线区域中三角形节点是新加入网络的节点,其他矩形节点是网络中原有的节点。此时,虽然有一些节点加入网络,但是网络的结构还是稀疏网络,节点之间的状态并没有太大的相关性,节点 A 的行为对于节点 B 的行为几乎不会造成任何影响。所以可扩展性在考虑节点之间行为的影响时是以节点之间行为相互独立为原则的。

图 9(b)为自组织技术可密集性应用的场景,与可扩展性的应用场景不同的是,可密集性的应用场景中网络范围并没有扩大太多,但是密度却大幅度增加,网络由稀疏网络变为了密集网络。由第 2 节可以看出,网络节点之间由于距离的减小,节点行为之间的相互作用已经对网络特性产生了很大的影响。图 9(b)中节点 A 的加入会对节点 B 原有的行为产生很大的影响,此时,如果还是将节点 A 和节点 B 行为视为相互独立,那么对于网络性能的分析就会产生很大的误差,导致网络性能的退化甚至崩溃。因此,如果在超密集无线网络中应用自组织技术,那么自组织技术的解决方案对可密集性的要求就是至关重要的。

3.4 自组织技术的典型应用

由于移动互联网用户数量不断增加,使网络规模越来越大,网络结构越来越复杂,网络参数优化、设计和维护的成本越来越高。而网络运营商在面对这些繁杂的问题,需要投入大量的人力、物力来解决,这又会导致网络部署、维护和升级更加困难,

造成大量的浪费，提高网络运营维护的成本。因此，网络运营商都能够在维持用户体验的基础上，减少部署、优化和维护升级中的人工干预。进而，网络运营商对于自组织技术的需求都是非常迫切的。图 10 为网络运营商在 2016 年对于各种技术的投入占比以及对 2020 年各种技术的投入占比的预测。

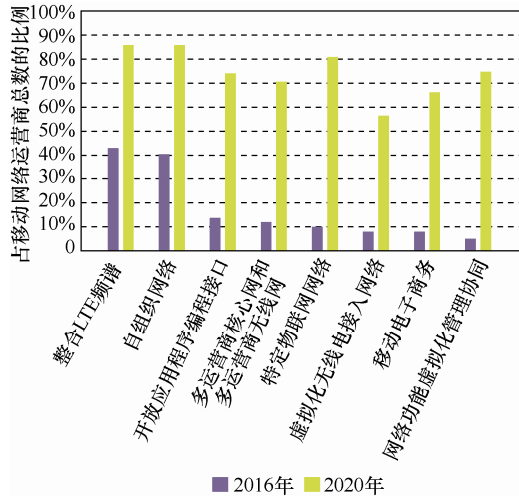


图 10 各运营商对各种技术的投入占比

图 10 中结果表明，在 2016 年有 40% 的运营商在自组织技术进行投入，而这一比例在 2020 年将上升到 90%，自组织技术的商用前景是非常巨大的。图 11 为几种自组织技术的典型应用。

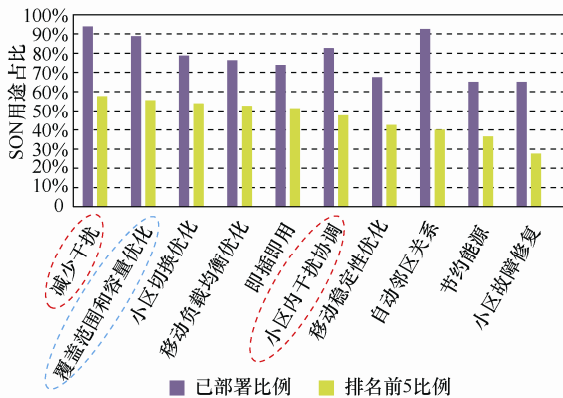


图 11 自组织技术的典型应用

图 11 中结果表明，自组织技术可以优化和管理很多方面，如干扰抑制、移动稳定性优化、小区覆盖范围和容量优化、小区间干扰协调等。

1) 干扰抑制

通过检测业务需求量，自动地开启或关闭系统中某些基站，以减少对周围其他小区的干扰。例如，

文献[13]中提出的 AOF (adaptive ON-OFF) 能量控制策略，可以根据用户接收到的信干噪比和信噪比信息，自适应地开启或关闭信道，从而减少对其他用户的干扰。在这个策略下，网络空间吞吐量与串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 和干扰对齐 (IA, interference alignment) 相比显著增强，更重要的是，临界密度进一步增加，这意味着可以支持更多的连接，而不会使网络性能下降。

2) 移动稳定性优化

用户在移动过程中，由于所在位置的变化导致接收的信号强度发生变化，如果系统在信号强度不能满足用户的业务需求时不能准确及时地切换承载业务的基站，就会恶化用户体验，影响系统性能。小区基站中的自组织技术对每次用户上传的报告进行分析，并根据分析结果对相应的参数进行动态的调整，以减少过早或过晚切换、不必要切换、切换到错误目标小区等不利事件的发生。

3) 小区覆盖范围和容量优化

小区的覆盖范围和容量是评估一个无线蜂窝系统性能的重要指标，然而从上述分析可以看出，网络的覆盖范围与网络的容量之间存在着相互制约的关系。因此，小区基站中的自组织技术需要根据小区内实时的业务负载量和负载分布来调整参数，改变小区的覆盖范围和容量，从而改善小区内用户的业务体验。

4) 小区间干扰协调

由于在小区内部的资源是统一分配的，所以不会存在相同时频资源块造成的同频干扰，而相邻小区之间由于资源的复用，会存在严重的同频干扰。为了减少小区之间的干扰，相邻小区基站中的自组织技术需要通过交互信令了解相邻小区时频资源的分布情况，然后结合本小区的实际情况，给小区中的用户分配资源并对每个用户的发射功率进行控制，以规避相邻小区之间的同频干扰。

对于无线蜂窝网络来说，小区覆盖范围和容量优化是最重要的事项之一。因此，在第 4 节将讨论如何应用自组织技术管理小区的覆盖范围和优化容量。

4 自组织技术应用与前景

4.1 自组织技术的实际应用

在第 3 节提到，管理小区覆盖区域和优化网络容量是自组织技术的一个重要应用场景。为了验证

自组织技术能否通过管理小区覆盖范围来对超密集无线网络的容量进行优化，在西安电子科技大学体育馆进行了相关实验的实地部署。该体育馆经常作为一些大型体育赛事举办地，在 2017 年 9 月还承办了全国第三届“互联网+”大赛。因此，该体育场可以作为超密集无线网络的典型场景。

在体育馆内部署了 28 个具有自组织能力的 LTE-A 接入点，该体育馆主场馆面积为 15 392 m²，其中，部署 22 个接入点，接入点密度达 1 400 个/平方千米。这些接入点是西安电子科技大学与华为技术有限公司、中国移动联合开发并实施布设的，能够支持业务自适应的小区分裂和融合功能。根据网络中业务量的变化，这些接入点能够自动融合为

一个小区或分裂为最多 20 个小区，相邻小区使用相互正交频段，每个小区最高可支持数百 Mbit/s 的下行速率。该超密集组网实验平台的核心技术就是由自组织技术驱动的小区分裂和融合技术。

图 12 为上述自组织技术实验平台的结构。该结构中包括密集网络资源管控功能实体 (DNRM)、区域接入资源管控功能实体 (LNRM) 和宏微协同资源管控功能实体 (CNRM)。根据业务量的不同，不同数量的 LNRM 能够形成一个小区。如图 12 中最右侧部分所示，2 个、4 个和 3 个 LNRM 可分别合并为 3 个小区，也可以统一合并为 1 个小区。

图 13 为体育馆内部真实的网络结构。根据业

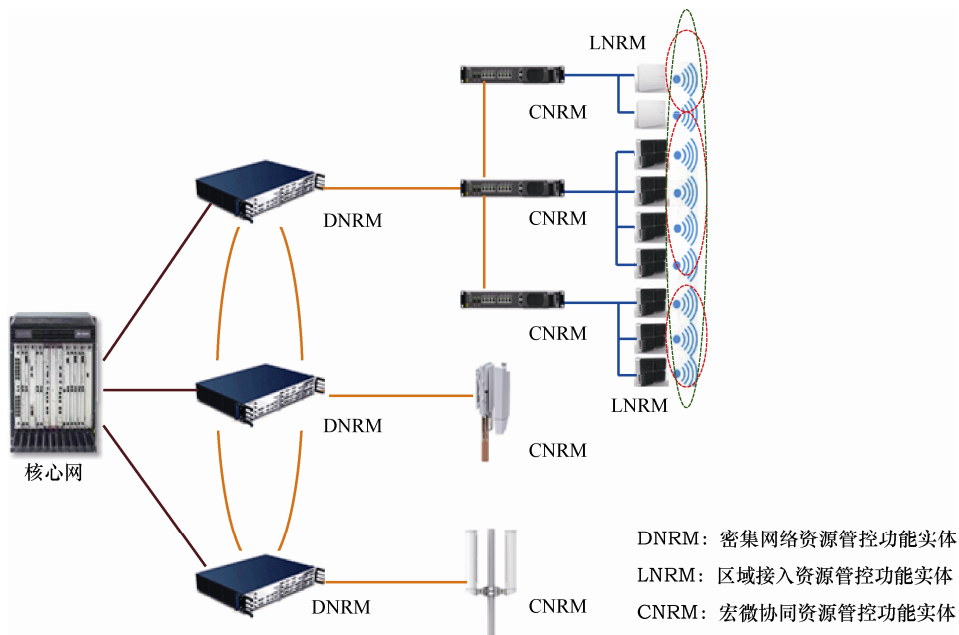


图 12 自组织技术的结构

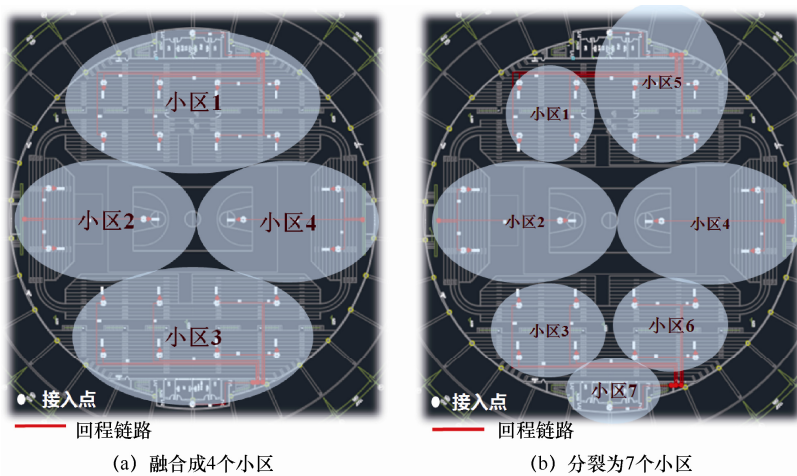


图 13 体育馆场景小区分裂示意

务量在时间和空间 2 个方面的分布，小区能够动态地分裂或融合来提供更好的用户体验以及更大的网络容量。由图 13(a)可知，当业务量较低时，所有接入点融合成 4 个小区就能够保证用户的服务质量 (QoS, quality of service) 需求；当业务量增加之后，4 个小区需要分裂为 7 个小区，如图 13(b)所示，提高网络容量，来保证用户的 QoS 需求。

表 2 为自组织技术实验平台的实地测试结果与 5G 需求的对比。表 2 的结果表明，自组织技术实验平台的连接密度高于 5G 的需求，说明自组织技术实验平台能够满足 5G 的需求。由于只使用了 LTE 的传输技术，所以平台的业务量密度仅为 5G 需求的一半，如果能将传输速率提高一倍，也就能够满足 5G 对业务量密度的需求。

表 2 自组织技术实验平台测试结果与 5G 需求对比

对比项	自组织技术实验平台	5G 需求
连接密度	1.7 m ²	1 m ²
业务量密度	>5 Gbit·s ⁻¹ ·m ⁻²	10 Gbit·s ⁻¹ ·m ⁻²
峰值速率	>2 Gbit·s ⁻¹	10 Gbit·s ⁻¹

4.2 自组织技术平台应用前景

经过上述的实验测试，验证了自组织技术实验平台在超密集无线网络中能够较好满足用户对 QoS 的需求，所以在大多数超密集无线网络中，该自组织方法都可适用，具有广阔的应用前景。例如，在北京国家体育场举办大型的体育赛事，当比赛开始时，观众们都在记录比赛的视频、照片。当

比赛结束时，大多数观众都会分享照片和视频，这就意味着此时会产生大量的突发访问，并且会导致突发冲突。这种情况的解决方案是动态链接资源分配。图 14 为原来的小区结构。当冲突发生时，过载的小区将尝试卸载它们的流量。由于左侧单元格和右侧单元格是相互时空隐蔽的单元格。如果每个小区只关心其邻居小区，则 2 个隐藏的小区可能将业务卸载到相同的邻居小区，这可能导致业务振荡。所以，首先确定左侧超负荷区域的最佳小区配置，小区分裂示意如图 15 所示。然后，将剩余小区按顺序完成配置，资源顺利传输。最后，突发访问的问题就可以被解决。通过这种方式，网络容量可能会增加 6~12 倍。

5 结束语

本文通过理论分析和实验验证对超密集无线网络和稀疏网络的无线信道进行对比，结果表明两者在网络的干扰分布和网络容量变化规律上有着本质区别。从网络容量角度，超密集组网技术在提升网络容量方面存在理论上限，即网络的过密部署将显著降低网络容量。为了解决这一问题，进一步提升超密集组网技术的性能，本文提出在超密集无线网络中应用自组织技术，并发掘了自组织应具有可密集性的新功能。最后，本文以自组织技术实验平台的部署为例，验证了所提自组织方法的有效性，为超密集组网技术及自组织技术在下一代无线网络中的应用提供技术支撑。

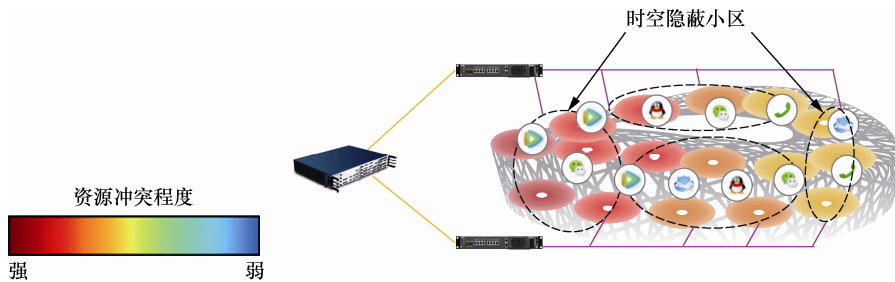


图 14 突发访问时小区结构

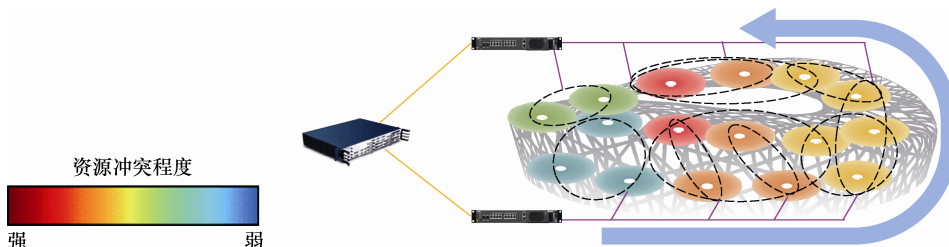


图 15 小区分裂示意

参考文献:

- [1] IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G vision and requirements[R]. 2015.
- [2] LIU J, SHENG M, LIU L, et al. Network densification in 5G: from the short-range communications perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 55(12): 96-102.
- [3] ZHANG H, DONG Y, CHENG J, et al. Front hauling for 5G LTE-U ultra dense cloud small cell networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(6): 48-53.
- [4] TECHNOLOGIES Q. Enabling hyper-dense small cell deployments with UltraSON[R]. 2014.
- [5] DING M, LOPEZ-PEREZ D, MAO G. Will the area spectral efficiency monotonically grow as small cells go dense?[C]//IEEE Globe Communications Conference. 2015: 1-7.
- [6] ZHANG X, ANDREWS J. Downlink cellular network analysis with multi-slope path loss models[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(5): 1881-1894.
- [7] GUPTA K, ZHANG X, ANDREWS J. SINR and throughput scaling in ultra dense urban cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications Letter, 2015, 4(6): 605-608.
- [8] DING M, WANG P, LOPEZ-PEREZ D, et al. Performance impact of LoS and NLoS transmissions in dense cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3): 2365-2380.
- [9] ZHANG X, ANDREWS J. Downlink cellular network analysis with a dual-slope path loss model[C]//IEEE International Conference on Communications. 2015: 3975-3980.
- [10] PREHOFER C, BETTSTETTER C. Self-organization in communication networks: principles and design paradigms[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(7): 78-85.
- [11] 李莉, 彭木根, 王文博. 下一代宽带移动通信系统中的网络自组织技术[J]. 电信技术, 2010, 1(5): 71-73.
LI L, PENG M G, WANG W B. Network self organization technology in the next generation broadband mobile communication system[J]. Telecommunication Technology, 2010, 1(5): 71-73.
- [12] 杨英. LTE 网络自优化方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
YANG Y. Research on the self optimization method of LTE network[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [13] LIU J, SHENG M, LIU L, et al. Interference management in ultradense networks: challenges and approaches[J]. IEEE Network, 2017, 31(6): 70-77.

[作者简介]



李建东 (1962-), 男, 博士, 西安电子科技大学教授, 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)、空间信息网络、智能无线网络、大规模自组织网、软件无线电和无线网络的干扰管理。



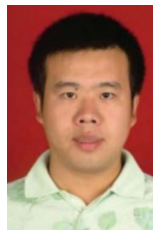
盛敏 (1975-), 女, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为移动通信系统、移动自组织网络、认知无线网络和异构网络融合。



刘俊宇 (1989-), 男, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为超密集异构组网技术、无线网络容量研究和室内定位技术。



赵晨曦 (1994-), 男, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为超密集网络和移动互联网。



张琰 (1983-), 男, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为异构融合网络和无线自组织网络技术。

孙红光 (1985-), 男, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为动态时分双工技术、5G 网络架构和超密集组网技术、新型数据中心网络虚拟化技术和自组织网络的弹性技术。