**自组织网络：现状挑战与未来**

**摘要：**在本文中，介绍了自组织网络（SON）的概况，以及基本原理和设备，并且第一次提出了先进的无线SON。对技术和业务需求做了简要介绍，并且强调了在SON研究中面临的挑战。此后，就SON和认知网络（CN）做了叙述。最后，就应用算法信息论（AIT）作为一种解决SON成长网络的复杂性问题可能的理论工具进行了讨论。

# 介绍自组织网络

自组织的现象在生活的许多领域是很普遍的。在自然界中，如鱼组织起来，游泳良好的结构群，蚂蚁找到达到食物的最短路线，萤火虫以同步的方式发光闪烁。自组织行为的其他例子可以在经济，人口动态，心理学和脑的理论来观察。在所有上述实例中，参与建立的实体不要求任何中央协调的组织结构。取而代之的是，实体直接交互彼此，以改变其本地环境。通常，这样的自组织系统是非常灵活，自适应，故障健壮的，可伸缩[1]。

近来，随着行为节点的统计和轨迹分析实用化，两种用于描述复杂网络的方法已被提出，该方法涉及小世界和无尺度的概念。小世界是在许多系统中，如在社会和通信网络观察一个属性，有这样的事实：实体（如人或网络节点）的距离小于人们的设想。大多数实体相连，因此它们之间的平均路径长度是小的，实体倾向于形成簇，并在平均值的连通分布的情况下达到峰值，然后按指数衰减。无尺度的属性是不随该系统的大小而改变，在我们的环境下该系统是网络。一个特殊的无标度特性是连接分布遵循幂律形式。这意味着，在一个无标度网络的连通性分布趋于保持不变，而与网络的大小无关。简单地说，任何两个实体之间的平均路径长度不会增大，它和网络的发展增加相互独立地[2][3]；这个性质可以在很多复杂的网络中观察到。对于把SON应用到无线通信中，有限的无线传播范围也实现了基本无尺度和小世界特性。

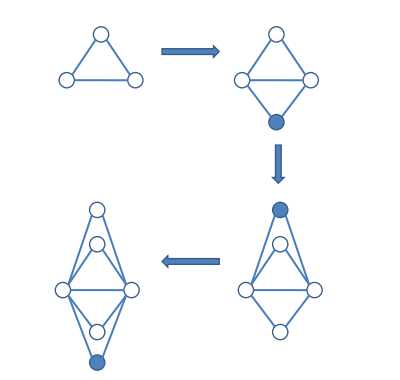


图1 SON增长和择优连接性

Barabasi在[4][5][6][7]中用网络中的以下特性开发了一种无尺度网络模型（图1）

* 真实网络随着新节点的加入不断扩大；
* 新的节点优先连接到已连接好节点。

生长和优先连接的特性导致无标度特性，该特性通常存在于大型网络中。而这是通过观察揭示的是，在一般情况下，在大型网络中大多数节点拥有非常少的连接，少量的节点（称为集线器）有大量的连接[8]。

接下来的论文以如下方式组成。在第二部分讨论了无线网络中的SON。第三部分讨论了SON的现状，第四部分讨论了技术和商用需求以及无线SON面临的挑战。第五部分讨论了SON和CN之间的关系。最后讨论了将AIT应用于复杂SON，第七部分总结了全文。

# 自组织网络及其基本原理

将SON应用到无线网络最近势头正盛；事实上，SON是改善OAM的重要驱动之一，他们有助于减少安装和管理的成本，通过自动化机制简化了操作任务。SON有三个主要阶段自配置、自优化和自我修复构成（图2）。

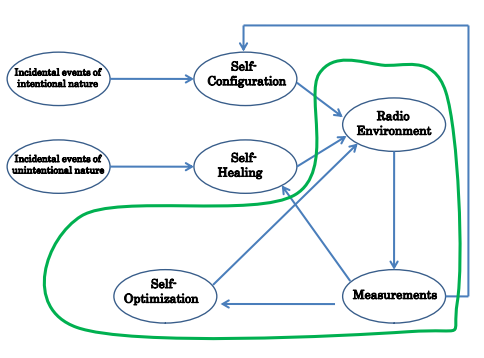


图2 SON循环

自配置阶段由偶然触发性事件引起，例如增加了一个新的网站或引进新的服务或网络功能。这些升级通常需要一个初始（重）配置一些无线电参数或资源管理的算法，例如导频功率和邻接表。他们就在可以优化作为连续自优化的一部分过程之前，这些参数必须事先设置[9]。

在自优化阶段，用智能方法处理测量来导出一组更新无线电（资源管理）的参数，包括例如对天线参数（倾角，方位角），电源设置（包括试点，控制和业务信道），邻居列表（小区ID及相关联权重），和其它无线电资源管理参数（入院/拥塞/切换控制和数据包调度）[9]。

由偶然的事件触发，如小区或站点的失败，自愈方法旨在解决由此类事件带来的覆盖和容量的损失。这是通过适当地调整在周围小区中的参数和算法进行的。一旦实际的故障已修复，所有的参数都恢复到原来的设置。

SON有可能影响资本相关的支出（CAPEX）和运营支出（OPEX）。事实上，目前约有17％的无线运营商的资本开支花在工程和安装服务[10]，因此自配置功能可以消除现场操作的基本设置和更新，这将减少资本支出。此外，由于约24％的典型无线运营商的收入进入到网络运营支出[11]，SON的自优化的功能可以帮助减少相关联的工作负荷与现场勘查和网络性能分析。此外，通过SON的应用产生的节能功能会降低在电力方面的设备所消耗的成本。此外，自优化和自治愈，通过优化网络参数，并通过减少的质量下降，有利于提高用户感知。

然而，对于无线SON的主要原理是不是当前的支出情况，而是下一阶段会发生什么。有几个原因，很可能未来小区将实现覆盖化和微型化：

* 新频谱将会是高频的；
* 虽然在频谱有效的通信方面已经有非常显著的进步，然而在蜂窝通信的的主要容量增长是由于增加的网络密度；
* 在小区范围内的高峰值速率优化将成为趋势。

在小区变得更小，并在数量可预见的增加情况下，网络的运营成本正成为主要的成本。运营成本的一个部分是OAM成本，这直接关系到SON的需要。

综上所述，对于SON适用于无线网络的主要驱动力是成本增加。

# 研究现状

**A. 标准化机构和研究组织**

2007年，新一代移动网络(NGMN)联盟公布了一份白皮书，其中强调几个使用情况，其中自动程序将被引入，为了使运行商提出改善下一代网络的运营效率的解决方案，3GPP的网络体系结构在[12]中讨论。另一个由NGMN披露的文档中，运营商正致力于实现SON，包括自配置、自优化、自治愈和SON-related OAM[13]。

关于标准化，3GPP已经将SON引入标准进程中，作为LTE部署的需求之一。在2008年，3GPP发布了自配置和自优化使用环境和解决方案的文档[14]。这是演进UMTS陆地无线接入网标准化工作的一部分。3GPP版本8包括对SON第一个正式要求，与运营商的流程整合，并确定主要的用例。第9版预计将定义改进的功能，包括引入自修复和自优化功能到LTE[15]。

SON标准化活动路线图可以概括为：

* 标准化进程：支持移动性自优化（自动邻区关系，移动鲁棒性优化，移动负载均衡），上行随机接入优化，小区ID冲突避免已经被写入LTE 版本8和9。支持节能和覆盖自优化将在版本10中引入。
* 标准化焦点：3GPP聚焦于接口，SON测量、控制触发器和信令交互。用于控制和优化算法不在标准化范围内。
* 工作方法：3GPP和NGMN的讨论都是面向用例的，每个用例都分别讨论，包括架构问题。到目前为止，用例之间的交互已经有一定成果。
* 结构：按照3GPP的原则和传统，允许便宜的，易理解的，可测试的实现，UE不实现任何SON功能，而是在网络中实现。RAN和其OAM系统之间的接口不是开放的。尽管已经有关于网络管理系统（NMS）方面大量标准化的努力，原则上SON功能结构的选择（分布式或集中式）由设备商决定。NodeBs间X2接口的信号支持已经被引入，以实现大多数情况下的分布式处理。

**B. 欧洲项目**

在欧洲目前已经有数个关于SON的项目。这里将介绍几个最有影响力的：

SOCRATES[16]是一个FP7项目，致力于开发自组织方案来增强无线接入网的操作，通过整合网络规划、配置和优化成一个单一的自动化过程实现最低人工干预。3GPP LTE无线接口已经被选为其中央无线电技术。

4WARD[17]致力于研究和开发下一代因特网的网络结构，通过虚拟化的网络资源，实现公共平台上的多个网络共存。通过利用一种新型运输方式，提高的网络效能，使其具有自我管理的能力，也会增加他们的鲁棒性和效率。该方案支持一个改进是，一个新的以信息为中心模式代替旧host-centric方法。这些解决方案接受从纤骨干网到无线传感器网的全方位的技术。4WARD同样致力于非技术方面，包括社会，商业和政府。

E3项目[18]致力于最优化无线资源和频谱的使用，通过利用认知无线电和特征包括重构性、自适应性、自主和协作行为的网络范式。项目利用可重构网络的功能和自适应动态响应变化的环境研究认知无线电的系统设计(CR)。协作CR资源管理、频谱管理和关注网络自组织集中决策，自主功能和基于终端决策的算法是主要其的研究领域。除了研究系统需求,特性和业务架构，该项目也研究监管和标准化。

FUTON[19]，也研究NMS使其符合下一代网络规格，优化异构无线资源和容错能力。FUTON构架包括混合radio-optical 基础设施、中央单位和移动/无线终端。

**C. 学术界和工业界**

在学术界已经有以下关于SON的研究，如[1],[3],[20],[21]，以及最近的[22]，[23]；其中后者分析了一些在LTE RAN中实现自优化的方案。在[23]中，研究了如何使系统运行于一个最优化状态。

几个主要的工业合作伙伴最近发布了SON的白皮书，清晰的显示了工业界对SON的关注[24]~27]。

# 需求和挑战

发展SON的需求可以大致分为以下功能两类：技术和业务需求。特定的技术要求的目的是帮助在新颖的算法和功能的发展，并突出为自组织相关的网络特性。技术要求将处理的内容包括：稳定性，鲁棒性，延时，SON功能相互作用，结构和可扩展性。

定义业务需求，有助于评估其所涉及的运营成本因素，并将其与开发解决方案相结合。这些需求可以大致分为成本效率和部署需求[28]。

未来的移动无线网络设计的有效性和可靠性是自组织功能所面临的的重大挑战，其中包括[29]:

* 测量和探测：这涉及一系列问题，如确定所需的数据类型，以何种速率收集它们，并且制定用于收集它们的技术。还有就是SON方法的最优性和执行这些流程相关的信令开销之间的权衡。
* 测量/数据处理：这涉及设计适当方法对采集测量结果和错误的测量结果的进行有效地处理；
* 不完整，延迟和错误反馈：这可能会影响自优化过程的效率，因此在设计算法时应考虑到降低性能的可能性；
* SON的可靠性：为了尽量减少人为干预，控制应是可靠的，自主的。

正如上面提到的，业务量和复杂性的减少是LTE无线接入网的主要驱动力。关于创新主要的考虑就是，该系统的可操作性在多厂商环境下应得到改善。关于这一点，其中最重要的是，不同的供应商的测量和性能数据共享同一语言。这种方式简化网络性能分析和故障诊断，并减少正常工作状态下的维护网络工作。

正如我们已经说过的，SON也致力于通过引入自配置和自优化机制尽量减少运营商的工作。特别是在早期部署阶段，配置和优化的需要通过花费大量的时间以获得最优秀和稳定的性能。因此，有必须在初期部署开始提供必要组自配置和自优化机制。

综上所述，我们可以看到，标准化被要求定义必要的测量，程序和开放的接口，支持多厂商环境下更好的可操作性。这种标准化的功能还应促进自配置和自优化。尤其，自配置/优化网络之间的相互作用和OAM必须考虑[14]。

# 自组织网络和认知网络的关系

认知网络（CN）由空间分布的节点构成，通过拓扑连接构成。节点通过本地连接相互协作，调整它们的状态以收集本地节点的信息和接收邻居节点发来的消息。到达任何特定的节点信息创建一个涟漪，即借助网络传播实现得以扩散的过程，相对于非认知网络，这导致了集体形式智能从而提高适应，学习，跟踪，和收敛行为。连接各节点的边可以按照交换过这些边缘的信息的质量可调权重进行分配；在这种方式下，CN同样可以调节他们的拓扑结构。在分布式处理技术这种自适应的网络不会遇到的经典的集中式网络融合方法的缺点，如由于中央节点的存在，中央熔接方法限制了网络的自主性和增加的故障的概率[30]。

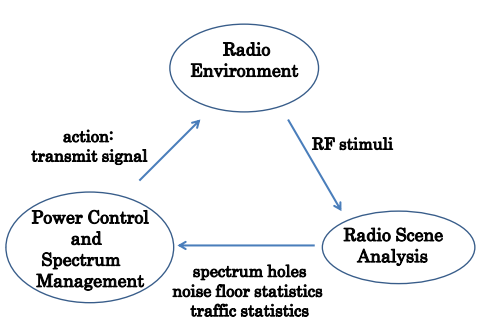


图3 CR环

社会和生物科学的研究中观察到动物群聚行为，虽然每一个动物个体在群体中不能展现出复杂的行为，在多个代理相结合协调下有规律的行为表现出了智能性。以类似的方式，CN受益雨节点间本地合作，从而导致性能的增强，例如在计改进的学习，鲁棒性，以及汇聚能力方面[30]。

CN可以通过分布式处理，执行各种任务，例如检测，估算，或资源分配。其应用包括环境监测，分布式事件检测，资源监控，目标跟踪等[30]。

认知循环后跟的CR（参照图3[31]）的谋求自由的频谱可以被看作是SON循环的一种特殊情况，如图2（一个盘旋在右下角的数字），即自我优化一个SON周期。

事实上，普适计算和网络正在成为无线通信的明显趋势：这是由于计算机处理器越来越成为日常生活的一部分，这些部分可以形成一个无线网络。这种趋势对对应于从大型到小型的进化，从而导致要消失具有以下特征的电子产品：低成本，小尺寸和低功耗[32]。最终的目标是全民在任何时候的可靠覆盖，这带来了一些挑战[33]:

* 这大量的设备将很快用完频谱资源；
* 大多数设备有功率限制；
* 无线有时候是不可靠的；
* 由于器件的巨大异构性，可能带来兼容问题。

在上述如此复杂网络环境中挑战只有在自组织的概念被部分应用于系统时才有望解决。尤其是，自组织/认知网络将在确定设备，系统，应用的频谱需要方面扮演重要角色

自由化尤其是认知网络的可能环境有[34]：

* 车载网络
* 无线传感网（应用，如为监测人类，生活和医疗辅助）
* 可穿戴式计算机

# SON在算法信息理论的应用

SON同样可以被视为解决网络复杂度不断增加的一种方案。SON在本质上是分布式的，这意味着相比于集中式网络有限的可用信息量；一个关键的问题，是如何量化并最小化所需的信息和交换的一个SON使得输出结果依然是可接受的。另一种和SON有关的情况是在网络中将信息发送给第三者。

要了解一个大型网络的结构（可是如生物，社会，或如在本文的情况下，技术），分解网络成更小的亚基或模块，可能是有帮助的。[35] 识别所述模块该网络可以找到最优分解压缩它的拓扑结构，利用的规律它的结构。假设一个信号装置充分了解网络结构，即邻接矩阵（考虑未加权无向网络X）

 （1）

希望在有限容量的条件下发送尽可能多的信息到接收端。接收器通过编码模块获得原始网络的最大信息量。一般情况下，问题是要确定的网络中的模块的数量，并且将节点分布到这些模块中。[35]提供了解决上述问题的方案依靠算法信息论（AIT）。

AIT是信息论，统计数据，递归论，计算机科学的一个分支，处理关系信息，随机性和计算处理之间的关系。AIT的一个重要的观念是柯尔莫哥洛夫复杂性。柯尔莫哥洛夫复杂性定义了字符串x的复杂度K，用图灵机U中的最短长度p描述。。一个字符串被称为简单串，假如它可以用一个简单的范式表示，是复杂的如果没有这种表示，例如一个随机字符串。K的一个重要性质是他和U的选择是独立的。更重到的是，它相对于其他码有更短的码长。K和香农熵S有很多相似的性质，但是K比S有更高的优先级。简而言之，K是一个极佳的复杂度度量[36]。

文献[35]的信号装置做的编码试图找到一个压缩网络结构，以使解码器能实现实际网络的最佳估算。为了尽量减少对原有网络X的描述长度，一个看起来为最小化的模块化描述Y加上条件描述长度的长度的模块，即[35]试图最小化和

 （2）

是信号的比特长度，是网络实际估计的Y的比特数。

上述描述的结果是导致了一种权衡，即可以捕获多少网络结构和可以交换多少数据之间的权衡。即有多少网络模块和它们的描述有多长。

通过抽象发现网络图问题推导数据压缩的问题，信息理论鉴于文献[35]提供了如何获得网络结构信息的一般途径。一种可能的无线网络SON的实现，是考虑加权网络而不是非加权网络，压缩和传输的不仅仅是信息，一个节点是否存在，还有连接的信道质量。这在网络资源自优化部署时是很有帮助的，无论是对于分布式网络还是集中式网络。

# 结论

本论文试图简要介绍自组织网络（SON），它们的性质和在无线网络中的应用。在简要介绍了SON之后，提出了无线SON的概念；介绍了最新的相关标准，包括欧洲项目，学术界和工业界的观点。之后，强调了无线SON的需求和面临的挑战。讨论了SON和认知网络之间的关系。此外，AIT作为一种支撑SON处理复杂网络环境需求的理论工具也做了简要介绍。

# 参考文献

1. C. Prehofer and C. W. Bettstetter, *Self Organization in CommunicationNetworks: Principles and Design Paradigms*, IEEE Communication Magazine, July 2005.
2. S. Dixit and A. Sarma, Advances in Self-Organizing Networks, IEEE Communication Magazine, July 2005.
3. S. Dixit, E. Yanmaz and O.K. Tonguz, On the Design of Self-Organized Cellular Wireless Networks, IEEE Communication Magazine, July 2005.
4. A-L. Barabasi, R. Albert and H. Jeong, Mean-field Theory for Scale-free andom Networks, Physica A, vol. 272, 1999, pp. 17387.
5. A.-L. Barabasi and E. Bonabeau, Scale-Free Networks, Sci. Amer., vol. 288, May 2003, pp. 5059.
6. A.-L. Barabasi and R. Albert, Emergence of Scaling in Random Networks, Science, vol. 286, Oct. 1999, pp. 50912.
7. R. Albert and A.-L. Barabasi, Statistical Mechanics of Complex Networks, Rev. Mod. Physics, vol. 74, Jan. 2002, pp. 4791.
8. X. Wang and G. Chen, Complex Networks: Small-World, Scale-Free and Beyond, IEEE Circuits and Sys., vol. 3, no. 1, 2003, pp. 620.
9. L. Schmelz et al., Self-configuration, -optimisation, and -healing in wireless networks, Wireless World Research Forum Meeting 20, April 2008.
10. J.M. Celentano, Carrier Capital Expenditures, IEEE Communications Magazine, June 2008.
11. S. Shen, How to Cut Mobile Network Costs to Serve Emerging Markets,Gartner Inc., November 2005.
12. NGMN Alliance, NGMN Use Cases related to Self Organising Network,Overall Description, white paper, May 2007.
13. NGMN Alliance, NGMN Recommendation on SON and O&M Requirements, requirement specification, December 2008.
14. Self-configuring and self-optimizing network use cases and solutions, 3GPP TS 36.902, September 2008.
15. NEC Corporation, Self Organizing Network: NEC’s proposals for nextgeneration radio network management, white paper, February 2009.
16. Self-Optimisation & self-ConfiguRATion in wirelEss networkS (SOCRATES), EU FP7 project, <http://www.fp7-socrates.org/?q=node/1>.
17. 4WARD, EU FP7 project, <http://www.4ward-project.eu/>.
18. End-to-End Efficiency (E3), EU FP7 project, <https://ict-e3.eu/>.
19. Fibre-Optic Networks for Distributed Extendible Heterogeneous Radio Architectures and Service Provisioning (FUTON), EU FP7 project, <http://www.ict-futon.eu/default.aspx>.
20. D. Alderson et al., A Contrasting Look at Self-Organization in the Internet and Next Generation Communication Networks, IEEE Communigation Magazine, 2005.
21. L. Jun et al., A Novel Network Management Architecture for Self Organizing Network, International Conference on Networking, Architecture and Storage (NAS), 2007.
22. M.I. Tiwana, B. Sayrac, Z. Altman, Statistical learning for automated RRM: Application to eUTRAN mobility, IEEE ICC, 2009.
23. L. Xu, C. Sun, X. Li, C. Lim, H. He, The methods to implementate self optimisation in LTE system, IEEE ICCTA, October 2009.
24. 3G Americas, The Benefits of SON in LTE - Self-Optimizing and SelfOrganizing Networks, white paper, December 2009.
25. Motorola, Motorola LTE Self Organizing Networks - Motorola’s revolutionary SON solution for LTE OPEX reductions, white paper, 2009.
26. Nokia Siemens Networks, Introducing the Nokia Siemens Networks SON Suite - an efficient, future-proof platform for SON, white paper, October 2009.
27. Texas Instruments, A. Gatherer, P. Dent, S. Bhadra, R. Vedantham, Selfoptimizing networks (SON): doing more with less, white paper, 2009.
28. L. Schmelz et al., Requirements for Self-Organizing Networks, SOCRATES Deliverable 2.1, FP7, March 2008.
29. J.L. Van et al., SOCRATES: Self Optimization and Self Configuration in Wireless Networks, COST 2100TD(08)422, Wroclaw, Poland, Feb 2008.
30. NSF Workshop on Distributed Processing over Cognitive Networks, <http://www.ee.ucla.edu/NSF%20workshop%202009.htm>
31. S. Haykin, Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, IEEE JSAC, vol. 23, no. 2, February 2005, pp. 201220.
32. J.M. Rabaey and D.O. Pederson, A Brand New Wireless Day – What does it mean for design technology?, Ambient Society Symposium.
33. J. Rattner, Crossing the Chasm between Humans and Machines...the Next 40 Years, Intel Developer Forum.
34. C. Bettstetter, Self-Organization in Computer and Communication Networks, available online at <http://www.bettstetter.com/talks/bettstetter-> 2009-12-wien.pdf, December 2009.
35. M. Rosvall and C.T. Bergstrom, An Information-Theoretic Framework for Resolving Community Structure in Complex Networks, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Applied Mathematics, vol. 104, no. 18, May 2007, pp. 7327-7331.
36. Algorithmic Information Theory, available online at http://www.hutter1.net/ait.htm