

一、项目名称

无线网络分布式计算

二、申报奖种

山东省自然科学奖

三、提名单位意见

大规模、异构无线网络在军事及民用领域都得到广泛的应用，智能物联网、5G/B5G 无线通信对无线网络通信提出很高的要求：低延迟、低能耗、高带宽、高密度连接等。当前，大规模、异构无线网络的绿色通信以及低延迟、安全可靠的通信要求对科研工作者提出了极大的挑战，因为集中式算法在大规模无线网络中几乎无用武之地。显然，分布式算法是解决大规模、异构无线网络通信的最佳手段。因为分布式算法只依赖于局部信息，只需要协调局部范围内的无线设备，无需网络的全局信息。本项目利用这一特点设计了解决一系列网络拓扑控制和调度问题的高效分布式算法，提出了利用分布式机制实现无线网络拓扑控制和调度的新思路，为超高密度无线网络提供容错性、节能、并行低延迟通信、高扩展性等解决方案。

该课题组是国内最早开展无线网络分布式计算机理论算法的研究团队之一，在无线网络的绿色通信及低延迟可靠的安全通信领域做了大量工作，取得了一系列有国际影响力的科研成果，多数成果在 JCR 一区期刊和中国计算机学会推荐 A 类期刊和会议发表，得到了同行专家的认可和高度评价，Google Scholar 引用次数 2900+，单篇最高引用次数 270+。其中，该团队提出的分簇和覆盖算法已被多部专业书籍作为典型算法收录。另外，该团队还创新性地将物理干扰模型引入分布式算法领域，开创的一些研究方向已被 MIT 等知名院校和研究机构的分布式计算研究团队跟进。

我单位认真严格地审阅了该项目的提名书及全部附件材料，确认该项目符合山东省科学技术奖规定的提名条件，全部材料真实有效，完成人、完成单位排序

无异议，提名书相关栏目均符合填写要求。

对照山东省科学技术奖授奖条件，提名该项目山东省自然科学奖二等奖。

四、项目简介

目前，5G/B5G 无线通信和网络及智能物联网得到快速发展，在智能工业控制、军事及民用领域等都得到广泛的应用。随着无线通信技术的不断演进，无线通信网络面临越来越大的能耗挑战。例如，在荒漠、深海中进行环境监测的传感器通常配备小容量的电池，低能耗、延长电池使用寿命是为无线网络设计算法时的首要考虑因素。节能减排、绿色通信是新一代无线通信的基本理念。另一方面，在以超高节点密度和实时可靠快速通信为特点的 5G 网络时代，对网络的容错性、并行性、空间复用、延迟、吞吐量、可扩展性、节能和异构容纳性提出了前所未有的挑战，亟需开展新型分布式机制研究，为 5G/B5G 协议的制定提供理论性指导。灵活、智能、高效和开放的 5G 通信网络正在成为现实，其低延迟通信和高吞吐量使得海量移动设备的接入成为可能，有效支撑各种新型网络如物联网、车载网络、机器人网络等网络 and 系统的发展。

随着移动通信设备的普及以及物联网的快速发展，大量的无线设备接入网络，尤其是智能物联网的应用要求实现万物互联，越来越多异构节点构成了大规模、结构复杂的异构网络。分布式算法只依赖于局部信息实现局部通信，其与生俱来的容错性、并行性和高扩展性可以为大规模无线网络计算提供完美的解决方案。

本项目一方面考虑无线网络实际特点，设计适合于实际网络运行的高效分布式算法，搭建理论和实际之间的桥梁，使分布式理论算法和思想更好地为无线网络的发展提供支持；另一方面，尝试建立无线网络分布式计算算法理论体系，为新型无线网络（如 5G/B5G、物联网、车载网络、机器人网络等）的发展提供理论基础和指导。本项目主要在无线网络中针对网络拓扑控制和通信调度等基础性问题开展分布式算法设计与分析，主要目的包括两个方面：一是减少无线网络能

量消耗、延长网络生命周期，实现无线网络的绿色通信；二是减小信号传输时延，提高无线网络吞吐量，实现快速、安全、可靠的实时通信。经过几年的努力，本科研团队做了一些具有重要意义的原创性工作，得到一批具有国际影响力的创新性研究成果。其中，8篇代表性论文全部发表在计算机科学领域知名期刊，包括IEEE/ACM Transactions on Networking、IEEE Transactions on Vehicular Technology、Journal of Network and Computer Applications、Sensors等。该项目的重要科学发现包括：

科学发现一：通过设计无线网络分布式拓扑控制算法减少网络节点的能量消耗、提高无线网络的寿命周期，解决绿色通信问题。

无线网络拓扑控制通过建立合理的层次化拓扑，实现网络节点之间的有效连接和层次化控制，提高网络通信的效率并有效降低网络的能量消耗，延长网络的寿命周期。本项目主要研究三种网络拓扑控制方法：网络节点分簇、连通支配集（虚拟骨干网）构建和支撑子图构建，研究工作主要包括：

(1) 提出了**异构网络中基于局部能量消耗预测的分布式分簇算法**，通过簇头选择和簇间构建路由树，以优化局部能量消耗的方式达到优化全局能量消耗的目的，同时平衡节点之间的能量消耗，延长网络的生存周期（代表作1）。

(2) 连通和覆盖是无线传感器网络的基本要求之一，**通过节点的睡眠调度减少节点的能量消耗**。进一步，为了提高覆盖的容错性，提出了分布式 k -覆盖算法，保证每个监测区域被 k 个簇头覆盖。**提出覆盖贡献区域的概念并考虑了节点的剩余能量**，提出了集中式和分布式 k -覆盖算法，与其他算法相比，实现了更低的簇头密度和更优的能量消耗（代表作2）。

(3) 将**分簇问题与连通支配集（虚拟骨干网）构建问题相结合**，在分簇基础上**构建多个不相交的支配集**，让支配集轮流为网络服务，以达到延长网络生存周期的目的（代表作3）。

(4) 首次提出了**基于物理干扰模型（信号干扰噪声比模型，SINR）的支撑**

子图的分布式构造算法，创新性地将物理干扰模型引入网络拓扑控制领域，提出的分布式算法可在亚线性时间内构建几乎最优的支撑子图（代表作4）。

科学发现二：通过有效地调度减少无线信号干扰、提高并行传输能力以达到降低传输时延，解决实时通信问题。

基于信道状况实现通信的稳定调度是保障上层算法稳定执行的基础。本项目主要考虑了媒介接入控制问题和链路调度问题，创新性地将物理干扰模型引入通信调度领域，减少信号的传输时延，在减少能量消耗的同时提高网络的吞吐量。研究工作主要包括：

(1) 针对媒介接入控制问题，提出可调节的节点休眠策略，实现异步环境下的节点休眠，节约节点的能量。另一方面，在考虑减少能量消耗的同时保障了较低的传输延迟，解决了此前固定异步休眠造成的高延迟问题（代表作5）。

(2) 结合能量分配，提出了有近似比保障的分布式最短链路调度近似算法，通过区域划分策略把物理干扰模型的全局性干扰局部化，降低了算法设计的难度（代表作6）；

(3) 结合能量分配和移动蜂窝网络区域划分的策略，提出了有理论性能保障的最短链路调度算法，通过“适当地”提高发送功率解决了困扰链路调度问题的“黑灰”链路调度。另外，通过理论分析及仿真实验证明，该算法在提高网络吞吐量的同时降低了网络的能量消耗（代表作7）。

科学发现三：建立合适的激励机制使网络节点合作转发数据包，完成相应的路由功能，降低数据包的传输延时，提升网络吞吐量。

容迟网络是分布式网络之一，在非合作容迟网络中，每个分布式节点具有一定的自私属性，没有动机去合作转发其他节点的数据包，使得网络的路由协议无法正常工作。因此，需要有合适的激励机制才能使网络中的节点合作转发数据包，完成相应的路由功能。主要研究工作：针对三种典型的攻击模型，即边插入攻击、边删除攻击和文本篡改攻击，提出了两种数据包转发安全激励机制，能够有效激

励网络节点合作转发数据包，完成特定路由协议（代表作8）。

五、客观评价

本科研团队是最早在国内开展无线网络分布式计算理论研究的团队之一，取得了一系列有国际影响力的研究成果，相关成果已发表在中国计算机学会推荐的A类期刊和会议、JCR一区期刊，包括IEEE/ACM Transactions on Networking、IEEE Transactions on Vehicular Technology、Journal of Network and Computer Applications、Sensors等知名期刊，Google Scholar引用次数2900+，单篇最高引用次数270+。其中，本团队提出的分簇和覆盖算法已被多部专业书籍作为典型算法收录，并出版一本英文学术专著（Jiguo Yu, Xiuzhen Cheng, Honglu Jiang, Dongxiao Yu. Hierarchical Topology Control for Wireless Networks: Theory, Algorithms, and Simulation, CRC Press, 2018）；创新性地将物理干扰模型引入分布式算法领域，开创的一些研究方向已被MIT等知名院校和研究机构的分布式计算研究团队跟进。

1. 科学发现—客观评价

(1) 代表性论文[1]: Jiguo Yu, Li Feng, Lili Jia, Xin Gu and Dongxiao Yu. A Local Energy Consumption Prediction-Based Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks, Sensors, 14(12): 23017-23040, 2014.

IET Fellow、澳大利亚詹姆斯·库克大学 (James Cook University, JCU) 的 Wei Xiang 教授在 IEEE Access (2017, 5: 2241-2253) 中指出我们的算法可提供更为精确和实际的分簇，达到整个网络能量消耗的最小化。原文如下：“In [32], a LECP-CP protocol is proposed, and the core of which includes a novel cluster head election algorithm and an inter-cluster communication routing tree construction algorithm, both based on the predicted local energy consumption ratio of nodes. What’s more, the protocol also provide a more accurate and realistic cluster radius to minimize the energy

consumption of the entire network.”其中，[32]就是我们的工作。中国地质大学周长兵教授在 *Personal and Ubiquitous Computing* (2018, 22(3): 597-613) 中认为我们的分簇机制可提高边界检测和缩减能量消耗。原文如下：“Generally, clusters are constructed by most techniques for improving the boundary detection accuracy and reducing the energy consumption [4].”其中，[4]就是代表性论文[1]。期刊 *International Journal of Electronics* 论文 (2017, 104(6):968-981) 对我们的工作给出了极高的评价，认为我们提出了一种极为新奇的分簇机制，可提供更为准确和实际的分簇半径以降低整个网络的能量消耗。原文如下：“Yu et al., 2014 have worked on novel clustering protocol where selection of CH and inter-cluster communication routing tree construction algorithm are stemmed on forecasting local energy consumption ratio of nodes. Besides, the algorithm provides more precise and practical cluster radius to reduce energy expenditure of the entire network.”

(2) 代表性论文[2]: Jiguo Yu, Shengli Wan, Xiuzhen Cheng, Dongxiao Yu. Coverage Contribution Area Based k -Coverage for Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66(9): 8510-8523, 2017.

代表性论文[2]中提出的分簇算法也被多篇论文作为基准算法。台湾省元智大学 I-Shyan Hwang 教授在期刊 *Sensors* (2017, 17(12): 2945) 论文中指出我们提出的覆盖贡献区域可作为延长网络寿命的重要参数。原文如下：“In [31], the k -coverage problem of WSN is handled by considering the Coverage Contribution Area (CCA) as a parameter to prolong the network lifetime.”其中，[31]就是我们的工作。台湾省高熊师范大学 Chia-Hsu Kuo 教授在 *IEEE Internet of Things Journal* (2018, 5(4): 3019-3030) 中认为我们的算法可在维持无线传感设备高剩余能量的情况下实现覆盖节点的低密度。原文如下：

“An area-based k -coverage scheme [27], called the k -coverage area coverage, was introduced to make the selection of the minimum nodes covered in RoI with a lower sensor spatial density under the relatively higher residual energies of the sensors in the WSNs.” 其中, [27]就是我们的工作。

(3) 代表性论文[3]: Jiguo Yu, Qingbo Zhang, Dongxiao Yu, Congcong Chen, Guanghui Wang. Domatic Partition in Homogeneous Wireless Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 37: 186–193, 2014.

代表性论文[3]被 IEEE Access 等多个权威性期刊发表的论文作为支配集分解的典型算法引用介绍。权威性期刊 IEEE Access (2018, 6: 17527–17532) 论文认为我们的成果进一步扩展了支配集问题。原文如下: “Further improvements are made by considering the dominating set problem as a domatic partition problem where multiple disjoint dominating sets determined are [19].” 其中, [19]正是我们的工作。期刊 *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology* (2015, 4(4): 25–28) 论文认为我们的支配集分解策略可极大地平衡节点之间的能量消耗并延长网络寿命。原文如下: “Through rotating each dominating set in the dramatic partition periodically, the energy consumption of the nodes can be greatly balanced and the lifetime of the network can be prolonged for setting up sleep scheduling in sensor networks [6].” 其中, [6]即为代表性论文[3]。

(4) 代表性论文[4]: Dongxiao Yu, Li Ning, Yifei Zou, Jiguo Yu, Xiuzhen Cheng, Francis C.M. Lau. Distributed Spanner Construction With Physical Interference: Constant Stretch and Linear Sparseness. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 25(4): 2138–2151, 2017.

北京师范大学别荣芳教授在多个期刊 *Procedia Computer Science* (2018,

129: 59-65)、Machine Vision and Applications (2018, 29(4): 601-615)、Journal of Database Management (JDM), 2018, 29(3): 17-42) 论文中引用代表性论文[4]。

2. 科学发现二客观评价

(1) 代表性论文[5]: Guijuan Wang, Jiguo Yu, Dongxiao Yu, Haitao Yu, Li Feng, Pan liu. DS-MAC: An Energy Efficient Demand Sleep MAC Protocol with Low Latency for Wireless Sensor Networks. Journal Network and Computer Applications 58: 155-164, 2015.

期刊 International Journal of Electronics (2017, 104(6): 968-981) 论文对我们提出的 MAC 机制给予了高度评价,认为我们的协议可根本性降低传输等待时间和能量消耗。原文如下: “Wang et al., 2015 have proposed a dynamic MAC protocol with asynchronous duty cycle called Demand Sleep MAC (DS-MAC) protocol which modifies sleep time in accordance with the traffic load. Here the concept of small token packets is used for waking up of the receiver to avoid the problem of overhearing. And also the wait in delay of source node is reduced by piggybacking ACK packets with prediction field. The protocol significantly lowers the wait time and energy consumption.”

(2) 代表性论文[6]: Baogui Huang, Jiguo Yu, Xiuzhen Cheng, Honglong Chen, Hang Liu. SINR Based Shortest Link Scheduling with Oblivious Power Control in Wireless Networks. Journal of Network and Computer Applications, 77: 64-72, 2017.

代表性论文[6]被多篇 JCR 一区和网络领域顶级期刊作为典型结果进行介绍,如 IEEE IoT Journal (影响因子, 5.863), IEEE/ACM Transactions on Networking(影响因子, 3.110), Journal of Network and Computer Applications

(影响因子, 3.991) 等。

(3) 代表性论文[7]: Jiguo Yu, Bangui Huang, Xiuzhen Cheng, Mohammed Atiquzzaman. Shortest Link Scheduling Algorithms in Wireless Networks Under the SINR Model. IEEE Transactions on Vehicular Technology 66(3): 2643-2657, 2017.

代表性论文[7]被多篇 JCR 一区和网络领域顶级期刊作为典型结果进行介绍, 如 IEEE/ACM Transactions on Networking (影响因子, 3.597), Journal of Network and Computer Applications (影响因子, 5.273), IEEE Transactions on Vehicular Technology (影响因子, 5.339), IEEE Transactions on Mobile Computing (影响因子, 4.474) 等。

3. 科学发现三客观评价

代表性论文[8]: Honglong Chen, Wei Lou, Zhibo Wang, and Qian Wang. A Secure Credit-Based Incentive Mechanism for Message Forwarding in Noncooperative DTNs. IEEE Transactions on Vehicular Technology 65(8): 6377-6388, 2016.

代表性论文[8]被多篇 JCR 一区和网络领域顶级期刊作为典型结果进行了介绍, 如 IEEE Communications Surveys & Tutorials (影响因子, 22.973), IEEE Journal on Selected Areas in Communications (影响因子, 9.302), IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (影响因子, 4.989), IEEE Transactions on Vehicular Technology (影响因子, 5.339) 等。其中期刊 IEEE Communications Surveys & Tutorials (影响因子, 22.973) 论文 (2018, 20(2): 914-944) 认为我们的结果可有效抵御三种典型攻击, 原文如下: “[182] introduce contribution time to reward relay nodes in the earliest delivery path of messages where the contribution time is the period of time between the receiving and forwarding of a message by a relay node. Using this

method, a malicious node has no incentive to launch the edge insertion, removal, or content manipulate attacks because only nodes in the earliest delivery path receive credit.” 其中[182]即为代表性论文[8]。

六、代表性论文专著目录

1. Jiguo Yu, Li Feng, Lili Jia, Xin Gu and Dongxiao Yu. A Local Energy Consumption Prediction-Based Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks, *Sensors*, 14(12): 23017–23040, 2014.
2. Jiguo Yu, Shengli Wan, Xiuzhen Cheng, Dongxiao Yu. Coverage Contribution Area Based k -Coverage for Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66(9): 8510–8523, 2017.
3. Jiguo Yu, Qingbo Zhang, Dongxiao Yu, Congcong Chen, Guanghui Wang. Domatic Partition in Homogeneous Wireless Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 37: 186–193, 2014.
4. Dongxiao Yu, Li Ning, Yifei Zou, Jiguo Yu, Xiuzhen Cheng, Francis C.M. Lau. Distributed Spanner Construction With Physical Interference: Constant Stretch and Linear Sparseness. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 25(4): 2138–2151, 2017.
5. Guijuan Wang, Jiguo Yu, Dongxiao Yu, Haitao Yu, Li Feng, Pan liu. DS-MAC: An Energy Efficient Demand Sleep MAC Protocol with Low Latency for Wireless Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications* 58: 155–164, 2015.
6. Baogui Huang, Jiguo Yu, Xiuzhen Cheng, Honglong Chen, Hang Liu. SINR Based Shortest Link Scheduling with Oblivious Power Control in Wireless Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 77: 64–72, 2017.
7. Jiguo Yu, Bangui Huang, Xiuzhen Cheng, Mohammed Atiquzzaman. Shortest Link Scheduling Algorithms in Wireless Networks Under the SINR Model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66(3): 2643–2657, 2017.

完成单位：中国石油大学（华东）

对本项目技术创造性贡献：参与了物理模型下无线网络调度问题分布式机制的研究工作。

八、完成人合作关系说明

本项目共有四位完成人，分别为禹继国（完成单位：曲阜师范大学）、于东晓（完成单位：华中科技大学）、黄宝贵（完成单位：曲阜师范大学）、陈鸿龙（完成单位：中国石油大学（华东））。其中，禹继国和于东晓有长期合作关系，在本项目无线网络拓扑控制的分布式机制设计方面开展合作；黄宝贵为禹继国博士研究生，在禹继国指导下针对物理干扰模型下分布式调度机制进行了研究，陈鸿龙参与了上述研究工作。