
大连理工大学

学术学位硕士研究生学位论文中期报告

论文题目：无线网络中信道资源利用率优化策略研究

姓 名：唐兆树

学 号：21417024

学科专业：软件工程

指导教师：马洪连

入学日期：2014.09

报告日期：2016.05.15

报告地点：大连理工大学软件学院

研究生院制表

说 明

硕士学位论文中期检查是保证学位论文质量、工作进度和研究生培养质量的重要措施。原则上，要求硕士生应在第4学期末进行中期检查，其中，2年制专业学位硕士生应在第3学期末进行中期检查。

一、考核内容：学位论文内容完成情况、阶段性成果是否正确，开题时方案是否需调整或已做了哪些调整，后续工作思路是否正确、工作进度是否有保障、预期目标能否实现、论文质量是否能够保证以及论文工作存在的问题等。

二、考核时间：原则上，硕士生的中期检查应在第4学期末进行，其中两年制专业学位硕士生的中期检查可在第3学期末进行。

三、报告撰写：中期报告正文字数不少于4000字，正文及参考文献等撰写要求参见《大连理工大学博士学位论文格式规范》。

四、考核办法：由学部（学院）组织，3-5名本学科领域硕导及以上专家组成评审专家组以答辩的方式进行。学生进行口头陈述时间不得少于10分钟。专家组给出考核成绩和是否通过的意见。

五、报告保存：中期报告一式两份，签字后分别由学部（学院）和学生保存。

六、信息登录：中期考核后，学生应及时登录研究生信息管理系统上传中期报告（PDF文档）及考核结果。

硕士学位论文中期检查报告正文

1 研究方案

随着移动终端的普及和移动网络的发展,无线网络已经完全融入生活。与此同时用户对带宽的需求提高,经常难以忍受办公环境或者公共场所中的无线网络传输速度。本课题优化网络频谱资源利用率主要是来源于现实生活中的一些想法,加上对新技术的好奇。为了解决该问题,从对用户的调度上来提高网络性能,并且采用了从全局到局部的研究路线,将问题逐渐缩小到无线局域网络中的基站用户选择调度问题,考虑网络的实际情况与信息来设计策略。

无线网络的传输速率慢、信号易受干扰、体系复杂等特点,使得如何提高无线网络信道资源利用率成为一个经典问题。无线通信中,干扰环境错综复杂,除了外界信号噪声干扰的情况,系统内部干扰(如:邻道干扰、互调干扰、远近效应等)也对系统性能有很大影响。同时有别于有线网络,无线网络的可用频谱资源带宽有限,爆炸式增长的信息数据量以及错综复杂的用户需求,导致了有限频谱资源与提高用户 QoS 之间的矛盾,有效的无线网络资源分配和调度策略成为了研究热点。

频谱利用率优化问题作为无线网络领域的经典问题,自 1968 年起研究者们就已经开始采用模型化的方式来解决该问题。对该问题的解决思路最朴实的是通过对频谱资源的分配和调度优化信道使用效率,在 1980 年^[1]首次将图论理论应用到对频谱利用率优化问题上,使用图着色模型来解决和优化频谱分配策略,从频谱的角度解决该问题。进而随着研究的深入,频谱分配问题被证明为是 NP 难问题,同时各种典型算法被提出并应用到调度策略中。本课题主要从用户层调度层面解决频谱利用率优化问题,对占用同一信道资源的用户,采用调度策略为每个时隙选择最佳组合,降低用户间干扰,提高网络容量达到优化频谱利用率的目的。

自从 Gupta 和 Kumar^[2]首次利用调度链路的方式优化网络性能后,无数的子问题被相继提出并研究,比如:最大链路调度问题 (MLS)^[3],最大加权链路调度问题 (MWLS)^[4]以及最短链路调度问题 (SLS)^[5]。Goussevskaia^[6]在文献中证明了基于 SINR 模型的调度问题属于 NP 难问题,并给出了在相同功率分配下近似调度算法。随着更深入的研究,研究者们不在局限于单纯以理论解决链路调度为目的,将该问题向实际情况靠拢。有了 Le 等人^[7]提出了基于干扰定位的分布式贪婪调度算法,每个链路与其周围的其他链路协调工作,但是由于累积干扰问题导致算法不适用于较大的网络空间。随后 Pei 和 Vullikanti^[8]基于 SINR 模型提出了局部分布式调度策略,并实现了最低吞吐量保证。除此之外结合功率控制

的调度算法, 如 Themistoklis^[9]将链路调度和功率控制问题整合为一个混合整数线性规划问题, 提供了解决问题的启发式算法, 该算法可以在不知道整个网络信息的情况下找到最接近最优解的分布式计算方式; 结合拓扑控制的调度策略, Hua^[10]研究了对任意构造的链路拓扑结构的不同调度算法; 联合路由的调度策略^[11]。

为了进一步优化信道资源利用率, 分集技术的引入, 多用户 MIMO 系统相关的研究最近几年被推上了热点, 研究者们也从理论^[12]及实践^[13]中给出了多用户 MIMO 系统的未来发展潜力。R.Liao 对当前多用户 MIMO 的 MAC 提案进行了详细的解释与整理, 给出了该方面的一篇调研工作^[14]。针对多用户 MIMO 中的多用户调度问题, 大量研究工作均采用 CSI 反馈信息, 致力于最大化网络吞吐量的同时尽可能的降低系统复杂度, Xie^[15]提出了可扩展性的用户选择机制, 采用 CSI 信息反馈, 但是将 CSI 的具体计算过程分散到用户终端, 基站中仅仅收取有限 CSI 信息降低了系统复杂度。但是实际系统中, CSI 的计算过程开销不可避免^[16], 进而避免使用 CSI 反馈信息的调度策略被大力研究, Zhou^[17]中将 CSI 计算过程放到了各自的用户终端中, 进行计算后相互评估, 但是这种方式仅仅适用于多用户 MIMO 系统的上行模式。被称为 PUMA 的用户调度策略在信道侦听之前, 利用多用户 MIMO 系统可以信息做出最佳用户选择, 完全避免了对 CSI 信息的依赖。

随着研究深入, 研究者们不再局限于单纯以提高网络容量增益为目的, 开始考虑到用户 QoS^[18]以及网络实际变化^[19]等因素。W.L.Shen^[20]为用户选择策略设计了一种新颖的搜索和状态更新策略, 可以根据网络状态调整策略, 并在网络聚合容量和计算复杂度之间设计了权衡策略, 可以根据需求改变调度方式。此外实测试验的深入^[21], 为多用户 MIMO 的研究提供了更多的选择, 研究工作也从理论向实际应用逐步深入。迄今为止, 多用户 MIMO 系统的 MAC 协议涉及主要针对三个方面: 吞吐量、复杂度以及用户 QoS。然而随着时间推移用户需求的不断变化使得一劳永逸的调度策略很难实现, 新技术的提出和实现是领域研究前进的动力来源。

无线信道作为共享媒介, 在用户进行合理资源竞争中, 需要提供公平有效的竞争策略, 保证用户 QoS 需求, 同时频谱资源的有限性, 使得提高信道资源利用率同样不可忽略。然而无线信道的固有特性、外界及内部环境干扰、实时性数据的高开销将该问题复杂化。本课题主要从两个方面出发: 首先从链路调度问题这一无线网络基础问题进行出发, 通过适用于不同应用场景的链路调度算法来提高网络性能; 然后将频谱资源调度研究细节化, 研究无限局域网中多用户调度策略, 进一步提高频谱利用率。

本课题的难点首先体现在无线网络的动态性、实时性, 无线网络的固有特性:

传输速率慢、信号易受干扰、体系复杂等使得无线网络的变化情况较多，移动速度、周围环境等等都会对网络性能产生影响。其次有别于有线网络，无线网络的除了外界信号噪声干扰的情况，系统内部干扰也对系统性能有很大影响，从而将无线网络干扰模型化的过程较为复杂。最后无线网络性能与用户 QoS 之间的矛盾性，任何系统都难以使得网络性能和用户竞争公平性处于最佳情况。

为了完成论文课题研究，首先针对无线网络的基本问题链路调度问题，采用定向天线的能量聚集特性，并根据累积干扰的物理干扰模型为定向天线环境建立干扰模型。为了解决链路调度问题，研究中根据经典策略，采用图理论的相关知识设计调度策略，并采用仿真实验的方式来评估算法性能。研究完无线网络的经典问题后，将研究背景限制到无线局域网中，采用当前 WLAN 的最新技术标准 802.11ac 中的多用户 MIMO 技术，研究该技术对无线局域网性能的增益提升，并着力于解决多用户 MIMO 下行链路的关键问题用户调度策略，以期待可以将多用户 MIMO 的增益最大化。研究中为了适应于无线网络的动态性，采用了有效 SNR 信息，并利用该信息设计下行速率预测机制，从而可以得到下行传输总时间。为了提高网络频谱利用率，采用了动态时间规划的思想，充分利用的网络传输时间，从而实现性能提高，并且实现了用户竞争公平性需求。由于实验条件限制，本次研究中也是采用仿真实验来分析调度策略性能。

进度计划调整：

(1) 2015.9 – 2015.11 根据课题背景调研并查阅相关文献，撰写文献综述及开题报告，对频谱利用率优化问题解决思路有了整体了解，并熟练掌握了课题相关的最新研究解决方法；

(2) 2015.12 – 2016.2 针对现有的研究方法进行整理重现等工作，研究高质量研究文献中的方法与不足，了解前沿技术以扩展知识视野，提出想法将链路调度与定向天线进行结合，利用定向天线特性提高链路调度性能；

(3) 2016.3 – 2016.4 与导师讨论问题解决的可行性，并完善解决思路设计算法，设计并实现仿真实验，记录实验结果并分析；

(4) 2016.5 – 2016.6 完成英文论文撰写并投稿；

(5) 2016.7 – 2016.9 将问题与现实情况结合，研究无线局域网当前的技术发展并发现问题，将多用户 MIMO 技术下行链路的用户调度作为研究课题的进一步深入，调研并研究相关解决方法；

(6) 2016.10 – 2016.12 设计问题解决思路，提出调度策略，进行 MATLAB 仿真实验，完成研究的实验分析过程；

(7) 2017.1 – 2017.2 整理研究过程中的所有结果与方法，并且准备论文撰写中需要的相关材料与导师讨论撰写论文的相关要点；

(8) 2017.3 – 2017.4 完成论文，整理材料。

2 研究进展与计划

现阶段的研究进展基本符合进度计划，在导师的指导下独立完成了一份属于自己的研究工作，从对问题的调研开始直到撰写英文论文发表，该过程让本人学到了研究工作的基本技能。目前学位论文的研究已完成了链路调度问题在采用定向天线的无线网络下的扩展，并利用定向特性将物理干扰模型扩展到可以应用于定向网络环境下的定向干扰模型，采用图论的相关知识设计解决该调度问题的近似调度策略，并给出仿真实验分析与数学推导。完成该部分工作后，将问题局限到无线局域网中，研究了无线局域网的新标准 802.11ac，对该标准中的多用户 MIMO 技术进行了深入学习，完成相关的技术调研，下一步准备详细研究发现问题并给予解决。现阶段的主要研究成果为完成链路调度问题的研究，发表论文至 CCF 指定 C 类会议中，并完成会议报告。

本论文研究工作的创新点主要表现在三个方面，首先是研究路线与研究方法方面。本课题的研究贯彻全局到局部的研究路线，从理论上研究无线网络的链路调度问题，逐步将问题局限到无线局域网中，与现实情况相结合，研究无线局域网的最新技术。

其次，在对无线网络链路调度问题的研究中，本文采用了将该经典调度问题扩展到定向环境中，通过对定向天线特性的研究，模型化定向天线辐射情况，结合目前研究中最贴近现实干扰情况的物理干扰模型，设计并给出了适用于定向环境的累积干扰模型。利用图论的相关知识，提出了解决定向环境下链路调度问题的近似算法并给出数学证明。

最后，本课题致力于研究无线局域网 802.11ac 标准中的多用户 MIMO 技术，对该技术所需面临的多用户选择问题进行研究，以期待通过信道状态信息等目前研究较为热门的工作进行入手，结合用户 QoS 需求来设计调度策略。

3 未来计划

目前论文研究工作已完成第一阶段的相关工作，并开始初步开始无线局域网中的相关工作。第二阶段的工作中，期望本课题研究可以在无线局域网的未来发展有一定的可利用价值，深入调研无线局域网新技术多用户 MIMO 面临的问题，并选择其中感兴趣的问题来设计解决方法。

出于对无线局域网 802.11ac 标准知识上的不足，为了避免在相关文献阅读研究上的困难，首先通过书籍阅读的方式将 802.11ac 标准了解了一番。由于多用户 MIMO 过于依赖信道状态信息，而该方面的知识相对而言偏向于通信层面，知识储备上可能会对该阶段研究工作有一定的影响，有幸的是实验室师兄长期以来研

究该方向，可以协助帮忙。实验设施上的不足也使得本研究的实验需要基于 MATLAB 仿真完成。

论文发表情况

1. A novel link scheduling algorithm for wireless networks using directional antenna, **Zhaoshu Tang**, Ming Zhu, Lei Wang, Honglian Ma. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2016 IEEE, 2016: 1-6. Doha, Qatar. EI 检索, EI 检索号: 20164102892645, CCF C 类会议。(本文第三章)

参考文献

- [1] Hale W K. Frequency assignment: Theory and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1980, 68(12): 1497-1514.
- [2] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.
- [3] Zhou Z A, Li C G. Approximation algorithms for maximum link scheduling under SINR-based interference model[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(7): 120812.
- [4] Wan P J, Jia X, Dai G, et al. Fast and simple approximation algorithms for maximum weighted independent set of links[C]. Proceedings of the 33st IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2014), 2014: 1653-1661.
- [5] Deng H, Yu J, Yu D, et al. Heuristic algorithms for one-slot link scheduling in wireless sensor networks under SINR[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(3): 806520.
- [6] Goussevskaia O, Oswald Y A, Wattenhofer R. Complexity in geometric SINR[C]. Proceedings of the 8th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing. 2007: 100-109.
- [7] Le L B, Modiano E, Joo C, et al. Longest-queue-first scheduling under SINR interference model[C]. Proceedings of the eleventh ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, 2010: 41-50.
- [8] Pei G, Vullikanti A K S. Distributed approximation algorithms for maximum link scheduling and local broadcasting in the physical interference model[C]. Proceedings of the 32st IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2013), 2013: 1339-1347.
- [9] Charalambous T, Klerides E, Wieseemann W. On the transmission scheduling of wireless networks under SINR constraints[M]. University of Cambridge, Department of Engineering, 2010.
- [10] Hua Q S, Lau F C M. Joint link scheduling and topology control for wireless

-
- sensor networks with SINR constraints[J]. Handbook of Research on Developments and Trends in Wireless Sensor Networks: From Principle to Practice, 2010: 184–208.
- [11]Even G, Matsri Y, Medina M. Multi-hop routing and scheduling in wireless networks in the SINR model[C]. International Symposium on Algorithms and Experiments for Sensor Systems, Wireless Networks and Distributed Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 202–214.
- [12]Lee D. Performance analysis of ZF-precoded scheduling system for MU-MIMO with generalized selection criterion[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(4): 1812–1818.
- [13]Aryafar E, Anand N, Salonidis T, et al. Design and experimental evaluation of multi-user beamforming in wireless LANs[C]. Proceedings of the 16th ACM international conference on Mobile computing and networking, 2010: 197–208.
- [14]Liao R, Bellalta B, Oliver M, et al. MU-MIMO MAC protocols for wireless local area networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(1): 162–183.
- [15]Xie X, Zhang X. Scalable user selection for MU-MIMO networks[C]. Proceedings of the 33rd IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2014), 2014: 808–816.
- [16]Miller R, Trappe W. On the vulnerabilities of CSI in MIMO wireless communication systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(8): 1386–1398.
- [17]Zhou A, Wei T, Zhang X, et al. Signpost: Scalable MU-MIMO signaling with zero CSI feedback[C]. Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. ACM, 2015: 327–336.
- [18]Esslaoui M, Riera-Palou F, Femenias G. A fair MU-MIMO scheme for IEEE 802.11 ac[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), 2012: 1049–1053.
- [19]Bejarano O, Hoefel R P F, Knightly E W. Resilient multi-user beamforming WLANs: Mobility, interference, and imperfect CSI[C]. Proceedings of the 35th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2016), 2016: 1–9.
- [20]Shen W L, Lin K C J, Chen M S, et al. SIEVE: Scalable user grouping for large MU-MIMO systems[C]. Proceedings of the 34th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2015), 2015: 1975–1983.
- [21]Zhang X, Sundaresan K, Khojastepour M A A, et al. NEMOx: Scalable network MIMO for wireless networks[C]. Proceedings of the 19th annual ACM international conference on Mobile computing and networking, 2013: 453–464.

大连理工大学学术学位硕士研究生学位论文中期报告评审意见表

学 号	21417024	学生姓名	唐兆树	导 师	马洪连
第一次中期检查 <input type="checkbox"/>			第二次中期检查 <input type="checkbox"/>		
<p>导师考核意见（对学位论文内容完成情况、阶段性成果、论文进度、后续工作思路、预期目标、及论文工作存在的问题等进行考查，给出考核成绩和具体改进意见和建议）：</p> <p>1) 考核成绩：<input type="checkbox"/> 优秀，<input type="checkbox"/> 良好，<input type="checkbox"/> 中等，<input type="checkbox"/> 及格，<input type="checkbox"/> 不及格</p> <p>2) 是否通过：<input type="checkbox"/> 通过，<input type="checkbox"/> 不通过</p> <p>3) 关于开题报告撰写质量及学位论文工作的具体意见（可加页）：</p> <p>该生现阶段的研究进展情况基本满足论文进展计划要求，按照当前的研究进度可以确定该生可以按时完成硕士论文。在研究内容上，该生紧扣无线网络中信道资源利用率优化的主题，完成了论文进展计划中的第一阶段工作，充分调研链路调度问题的相关研究工作，熟练掌握了现阶段对该问题的解决思路，并创新性的将问题扩展到定向天线环境中，提出适用的基础模型及近似算法并完成了实验分析。研究过程中，该生思路清晰，善于发现问题并提出想法，遇到问题勤于讨论以寻求帮助，目前已掌握学术研究的基本思路与技能。</p> <p>对于尚未完成的第二阶段研究工作，该生秉着由全局到局部的研究问题思路，以期待将研究工作向现实实践中靠拢，将研究背景局限到无线局域网中的多用户 MIMO 技术，并对该方面的新技术进行了深入全面的调研，将整体问题分成两个部分：用户选择与编码策略，对于将来需要完成的工作，该生也给出了详细的问题分析并对针对不同的问题提出了初步的解决思路，例如可能遇到的信道状态信息相关知识不足等挑战。该生对该阶段研究工作的详细计划可以基本保证该部分研究工作的顺利进行与完成。</p> <p>同时，该生在论文撰写方面，结构清晰合理，内容丰富，符合学校论文质量要求。</p> <p>综上所述，同意该生通过中期考核。</p> <div style="text-align: right; margin-top: 100px;"> 导师签字： <div style="display: inline-block; width: 150px; height: 30px; border: 1px solid black; vertical-align: middle;"></div> </div>					

评审 专家 组		姓名	职称	学科专业	是否博导	签字
	组长					
	成员					
<p>专家组评审意见（对学位论文内容完成情况、阶段性成果是否正确、研究方案和进度是否合理、开题时方案是否需调整或已做了哪些调整，后续工作思路是否正确、工作进度是否有保障、预期目标能否实现、论文质量是否能够保证以及论文工作存在的问题等进行考查，给出考核成绩，投票表决是否通过，并给出具体改进意见和建议）：</p> <p>1) 考核成绩：<input type="checkbox"/> 优秀，<input type="checkbox"/> 良好，<input type="checkbox"/> 中等，<input type="checkbox"/> 及格，<input type="checkbox"/> 不及格</p> <p>2) 是否通过：<input type="checkbox"/> 通过，<input type="checkbox"/> 不通过</p> <p>3) 具体意见（可以加页）：</p> <p>该生学位论文研究方案具有较高的可行性，论文进度计划合理，对论文整体安排明确，思路清晰，课题目前进展过程较为顺利。现阶段论文紧扣无线网络信道资源优化的研究目的，从全局到局部的研究思虑使得整个研究更加贴近实际情况，当前的研究成果也证实了研究工作的价值。该生对研究工作第二阶段内容有明确的研究计划与思路，对可能遇到的难题的充分整理与分析，保障了后续工作进度与目标，对无线局域网前沿技术的研究，将信道资源优化与技术发展结合，提高了课题研究价值。论文撰写思路明确，结构清晰合理，符合要求。</p> <p>综上所述，同意该生通过中期考核。</p> <p>组长签字：_____年 月 日</p> <p>点长意见：_____</p> <p>点长签字：_____年 月 日</p>						