2019年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

1. 项目名称

非授权频段下具有多业务支持能力的多址接入系统性能分析与优化

1. 提名者及提名意见

提名者：陕西通信学会

提名意见：

该成果系统研究了非授权频段下支撑多业务能力的多址接入技术。

针对现有的单用户多业务、多用户多业务接入架构，揭示了系统最佳工作点的存在性和可达性，并分别提出了分布式自适应性能优化策略LABS、免触发的OMAX协议、OFDMA与全双工结合的Fu-Plex协议。

针对下一代网络负载高和站点部署密集环境，研究了可靠带内预约机制和空时频资源块与多业务流的映射机理，并分别提出了一种多步带内信道预约机制、一种基于时间和空间的多业务流优化策略。

该项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。

我会提名该项目申报陕西省自然科学二等奖。

1. 项目简介

非授权频段指的是不需国家有关部门批准，即可在工业现场、科学研究、医疗应用以及人们的日常生活等场景使用的无线频段，也被称为ISM 频段。针对无线网络非授权频段中多业务服务质量需求差异性大、接入环境动态多变、以及接入方式灵活多样的技术挑战，该项目研究了多址接入技术中的若干基础性科学问题，主要科学发现点包括：

**研究内容与科学发现 1)** 针对非授权频段单用户多业务接入架构，研究了随机退避竞争窗与网络吞吐量之间的内在关系，揭示了系统最佳工作点的存在性与可达性，并提出了一种分布式自适应性能优化策略LABS。

在这部分研究中，基于二维马尔科夫链对最佳工作点进行了建模分析，从而明确回答了若干基础性的理论问题。这些问题包括：多业务情况下系统最佳工作点是否存在？其唯一性如何？如何找到最佳工作点？最佳工作点所对应的系统最大通过量是多少？是否有可能仅仅通过判断某些简单的性能指标，就可以判断出系统是否工作在最佳工作点处（或其附近）？进一步，基于对最佳工作点的分析，提出了一种分布式自适应性能优化策略LABS。其基本思想是通过节点对空口接入环境的感知，自适应调整其退避窗尺寸，从而使系统锁定在对应最大吞吐量的最佳工作点附近。这部分工作已被他引37次。

值得指出的是，这部分工作是基于第一完成人于2003年在意大利博士后工作期间的“Performance Analysis of an Enhanced IEEE 802.11 Distributed Coordination Function Supporting Service Differentiation”工作，这是属于国际上该领域工作中最早的研究成果之一，该论文目前已被他引80次。

**研究内容与科学发现 2)** 针对非授权频段多用户多业务接入架构，研究了接入用户数、网络时频资源块数与网络吞吐量之间的内在关系，揭示了最大网络吞吐量的存在性和可达性，并分别提出了一种基于免触发的OFDMA MAC协议OMAX，和一种全双工MAC协议FuPlex。

OMAX的核心思想是将信道（全信道）进一步划分为多个子信道。多个节点采用分布式的方式，并发地在全信道上执行时频二维快速退避，并且退避结束后在粒度更细小的资源块级别完成信道接入。这样一来，系统接入点在免除发送触发帧的前提下，多个用户即可以同时实现并发接入，提升了网络吞吐量。基于二维马尔科夫链，对OMAX进行了分析和建模，揭示了网络最大吞吐量的存在性和可达性。此外，全双工通信技术能够使得多用户同时上行和下行传输，从而提出了一种全双工多址接入协议FuPlex。其基本思想是在非对称全双工情形下，设计了具有良好兼容性的全双工多址接入协议，可以由下行链路首先发起传输，也可以由上行链路首先发起传输，并解决了其中的关键技术挑战：上行链路随机接入冲突问题。这部分工作已被他引34次。

值得指出的是，基于所提出的免触发帧机制所设计的OMAX协议的性能明显优于即将发布的WLAN 标准IEEE 802.11ax（Draft 4.0版本）。所提出的全双工多址接入协议FuPlex与现有IEEE 802.11ax标准保持了良好的兼容性。鉴于此，我们正积极向下一代WLAN 标准IEEE 802.11be工作组推荐该部分研究成果，拟争取将其纳入到下一代WLAN国际标准中。

**研究内容与科学发现 3)** 针对非授权频段高网络负载和密集部署环境，研究了用户间分组冲突概率、信道预约机制可靠性和网络吞吐量之间的内在关系，揭示了可靠带内信道预约机制的基本设计方法，并提出了一种基于多步带内信道预约机制的接入策略。

我们发现，国际上对信道预约机制的可靠性研究几乎处于空白状态。因此，在这部分研究中，针对提升预约可靠性，提出了多步信道预约机制，其核心思想是通过对特定时隙进行多次（即m>1）预约广播，从而提高信道预约的成功率（即可靠性）。由于对将要发生的数据传输进行了多次广播预约，因此在该预约时隙发生分组冲突或是信道传输差错的可能性都会大大降低。进一步，对所提出的基于多步信道预约机制MAC协议（m-DIBCR）进行了深入的理论建模与分析，得出分组冲突概率和预约步数的解析关系式。理论分析和仿真性能验证表明，多步信道预约机制可以在不带来过多信令开销的情况下，显著提升信道预约的可靠性。这部分工作已被他引12次。

值得指出的是，所提出的多步信道预约机制已经得到了华为公司相关技术团队的青睐，拟进一步探索将其应用于具体产品中的可行性。

**研究内容与科学发现 4)** 针对非授权频段高网络负载和密集部署环境，研究了空时频资源块与多业务流间的优化映射机理，揭示出了最优业务调度策略的基本设计方法，并分别提出了一种基于时间维度和基于空间维度的多业务流优化调度策略。

首先，在时间维度方面，基于最优止步理论对数据传输机会（TXOP）的到达数，与其业务调度策略之间的映射关系进行了建模分析，发现具有多种服务质量要求的业务调度策略存在最优解，并进一步证明了该最优解的唯一性，提出了基于时间阈值的单链路最优止步业务调度策略。其次，在空间维度方面，基于最大团理论对并发多链路的空间干扰关系进行了建模分析，发现对于具有网络最大吞吐量需求的并发多链路业务存在近似最优解，提出了基于最大团的多链路并行传输的业务调度策略，提升了网络对多种服务质量要求的多业务支撑能力。这部分工作已被他引20次。

值得指出的是，最大团并行多链路业务调度思想，在团队与中电某研究所的合作项目中已经被实际应用于相关网络产品中，其性能得到了合作方的认可。

1. 客观评价

**4.1 科学发现点1的客观评价：**

在发表在IEEE Transactions on Wireless Communications ( Volume: 12 , Issue: 1 , January 2013 )的学术论文“Throughput Optimization of Heterogeneous IEEE 802.11 DCF Networks”中，Yayu Gao等评价代表性工作1时指出“目前大多数建模分析无线局域网的工作均建立在求解复杂的非线性方程组的基础上，导致较高的计算复杂度。同时这些方法也无法获得有关系统工作点的闭合解析解，从而使得系统优化工作难以开展。为此，代表性工作1提出了一种近似的工作点分析方法，得到了系统工作点的近似闭合表达式，使得在饱和状态下通过优化最小竞争窗来最大化系统吞吐量称为可能”。

在发表在IEEE Communications Letters ( Volume: 13 , Issue: 5 , May 2009 )的学术论文“A simple adaptive optimization scheme forIEEE 802.11 with differentiated channel access”中，Jianbin Mao等评价代表性工作1时指出“该工作基于相关的分析建模，针对网络中的每一类节点，近似推导出了可以实现系统最大吞吐量的最佳退避竞争窗尺寸”。并将该工作作为此类研究的代表性工作加以引用。

在发表在IEEE Transactions on Wireless Communications ( Volume: 8 , Issue: 6 , June 2009 )的学术论文“Novel adaptive DCF protocol using the computationally-efficient optimization with the feedback network information for wireless local-area networks”中，Shih Yu Chang等评价代表性工作1时指出“该工作发现了节点的最小竞争窗尺寸对网络性能的显著影响这一事实”。

**4.2 科学发现点2的客观评价：**

发表在Transactions on Networks and Communications （Volume：6，Issue：4，August 2018）中, 2018, 6(4): 14】的学术文献Optimizing TCP Goodput and Delay in next generation IEEE 802.11 (ax) devices中，Oran Sharon等在评价OMAX协议时指出， OMAX协议是针对下一代WLAN的一个高效的OFDMA多址接入协议，并且以OMAX为该论文的基线方案来设计和对比所提的HMAC协议。

发表在IEEE Communications Surveys & Tutorials（Volume：21，Issue：1，January 2018）的学术文献文献“A review of software-defined WLANs: Architectures and central control mechanisms”中，BehnamDezfouli等在评价OMAX协议时，详细介绍了OMAX的协议流程，并且基于OMAX的体系框架，设计了更加具体的资源分配算法使得OMAX协议更加丰富。

发表在IEEE Transactions on Wireless Communications（Volume：17，Issue：6，September 2018）的学术文献“Hybrid MAC protocol design and optimization for full duplex Wi-Fi networks”中，北京大学的Lingyang Song教授（IEEE高级会员）等在评价FuPlex时特别指出，FuPlex的重要贡献在于上行链路随机竞争的技术问题进行了分析并提出了解决方案。

**4.3 科学发现点3的客观评价：**

在发表在IEEE旗舰会议Communications (ICC) 2012 IEEE International Conference的学术论文“Distributed adaptive backoff reservation (DABR) for IEEE 802.11 wireless networks”中，SinaAsadallahi等评价代表性工作5和6时指出“该工作提出通过将后续分组的退避值携带在当前分组中提前广播出去的预约方式，可以提升网络的吞吐量”。并进一步指出“该工作适用于单跳的无线网络中”。

在发表在The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications（Volume 19, Issue 2, April 2012）的学术论文“Optimized in-band control channel with channel selection scheduling and network coding in distributed cognitive radio networks”中，Ping ZHANG等将代表性工作5作为带内信道预约的代表性方案，与其所提出的带内信道预约方案NC-CSS进行了性能对比。通过性能对比，进一步肯定了采用带内信道预约方法，将有利于提高频谱利用率。

**4.4 科学发现点4的客观评价：**

在发表在通信领域JCR一区的IEEE Communications Survey & Tutorials期刊上的论文“Decision-theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: Strategies, challenges and solutions”中，专门对最优止步理论（optimal stopping theory）进行了综述，并将代表工作7作为“典型的将最优止步理论应用到车载容迟网络中进行业务调度”的案例进行了介绍。在发表在IEEE Communication Letters的论文Adaptive Carry-Store Forward Scheme in Two-Hop Vehicular Delay Tolerant Networks中，作者基于代表工作7中的车载容迟网络模型，提出了一种自适应的Carry-Store转发方法。

在发表在IEEE Transaction on Wireless Communications的论文“A cross-tier scheduling scheme for multi-tier millimeter wave wireless networks”中，作者指出代表工作8提出的算法“利用了‘小型’毫米波网络中的空间复用性”，但是没有考虑多跳传输场景，并基于此考虑了“多层”（multi-tier）毫米波网络中的调度问题。在发表在通信领域JCR一区的IEEE Journal on Selected Areas in Communications期刊的论文“Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks”中，作者指出代表工作8为小型毫米波网络“提出了有效的提升网络容量的调度算法”。

1. 代表性论文专著目录（不超过8篇）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过8篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表2年以上即2017年4月30日以前公开发表，其他要求参见《提名工作手册》相应内容。）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 论文专著  名称 | 刊名 | 作者 | 年卷页码（xx年xx卷xx页） | 发表时间 | 通讯作者 | 第一作者 | 国内作者 | SCI他引次数 | 他引总次数 | 知识产权是否归国内所有 |
| 1 | Achieving Optimal Performance by Using IEEE 802.11 MAC Protocol with Service Differentiation Enhancements | IEEE Transactions on Vehicular Technology | LI Bo, Roberto Battiti, FANG Yong | 2007年56卷3期1374-1387页 | 2007年05月01日 | Bo Li | Bo Li | 李波，方勇 | 10 | 22 | 是 |
| 2 | Achieving Optimal Performance in IEEE 802.11 Wireless LANs with the Combination of Link Adaptation and Adaptive Backoff | International Journal of Computer Networks | LI Bo, Roberto Battiti | 2007年51卷6期1574-1600页 | 2007年  04月  25日 | Bo Li | Bo Li | 李波 | 4 | 15 | 是 |
| 3 | An OFDMA based concurrent multiuser MAC for upcoming IEEE 802.11ax | 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops | Qiao Qu, Bo Li, Mao Yang and Zhongjiang Yan | 2015年136-141页 | 2015年  06月  11日 | Qiao Qu | Qiao Qu | 屈桥，李波，杨懋，闫中江 | 7 | 27 | 是 |
| 4 | FuPlex: A Full Duplex MAC for the NextGeneration WLAN | 11th EAI International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness | Qiao Qu, Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, XiaoyaZuo, and Qiaoyan Guan | 2015年1-7页 | 2015年  12月  01日 | Mao Yang | Qiao Qu | 屈桥，李波，杨懋，闫中江，左晓亚 | 3 | 7 | 是 |
| 5 | Performance Analysis of an Efficient MAC Protocol with Multiple-Step Distributed In-Band Channel Reservation | IEEE Transactions on Vehicular Technology | LI Bo, LI Wei, VALOIS Fabrice, UBEDA Stephane, ZHOU Hu, CHEN Yi | 2010年59卷1期368-382页 | 2010年  01月  01日 | Bo Li | 李波 | 李波，李伟，周虎，陈熠 | 1 | 6 | 是 |
| 6 | m-DIBCR: MAC Protocol with Multiple-step Distributed In-Band Channel Reservation | IEEE Communications Letters | LI Bo, TANG Wenzhao, ZHOU Hu, ZHANG Hui | 2008年12卷1期23-25页 | 2008年  01月  01日 | Li Bo | 李波 | 李波，唐文照，周虎，张辉 | 1 | 6 | 是 |
| 7 | Optimal traffic scheduling in vehicular delay tolerant networks | IEEE Communications Letters | Zhongjiang Yan, Zhou Zhang, Hai Jiang, Zhong Shen, and Yilin Chang | 2012年16卷1期50-53页 | 2012年  01月  01日 | Zhongjiang Yan | Zhongjiang Yan | 闫中江，张周，江海，沈中，常义林 | 7 | 12 | 是 |
| 8 | A Heuristic Clique Based STDMA Scheduling Algorithm for Spatial Concurrent Transmission in mmWave Networks | 2015IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) | Yan Zhongjiang, Li Bo, ZuoXiaoya, Yang Mao | 2015年1036-1041页 | 2015年  06月  17日 | Zhongjiang Yan | Zhongjiang Yan | 闫中江，李波，左晓亚，杨懋 | 3 | 4 | 是 |
| 合 计 | | | | | | | | | 36 | 99 | 是 |

1. 主要完成人情况（不超过6人）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目贡献 |
| 李波 | 1 | 无 | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 本项目重要科学发现点1和3的学术思想提出者、重要科学发现点2中代表作论文3的学术思想提出者；代表作论文1-2和5-6的第一作者，完成了这些论文中理论建模分析与推导、算法设计、性能验证、论文撰写与修改等主要工作；辅助完成了论文3-4和8的理论建模分析与推导、算法设计、性能验证、论文撰写与修改等工作；支撑本项目的2项国家自然基金面上项目的主持人。  在科学发现点1中，研究了并揭示了单用户多业务系统最佳工作点的存在性与可达性，提出了一种分布式自适应性能优化策略LABS。在科学发现点3中，研究并揭示了高网络负载和密集部署环境中，可靠带内信道预约机制的基本设计方法，提出了一种基于多步带内信道预约机制的接入策略。 |
| 闫中江 | 2 | 无 | 副教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 本项目重要科学发现点4的学术思想提出者；代表作论文7-8的第一作者，完成了这些论文中理论建模分析与推导、算法设计、性能验证、论文撰写与修改等主要工作；辅助完成了论文3-4的理论建模分析与推导、算法设计、性能验证、论文撰写与修改等工作。  在科学发现点4（论文7-8）中，针对非授权频段高网络负载和密集部署环境，研究了空时频资源块与多业务流间的优化映射机理，揭示出了最优业务调度策略的基本设计方法，并分别提出了一种基于时间维度和基于空间维度的多业务流优化调度策略。 |
| 杨懋 | 3 | 无 | 副教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 本项目重要科学发现点2中代表作论文4的学术思想提出者；代表作论文3-4的通讯作者，辅助完成了其中的理论建模分析与推导、算法设计、性能验证、论文撰写与修改等工作；辅助完成了论文8的理论建模分析与推导、算法设计、性能验证、论文撰写与修改等工作。  在科学发现点2（论文3-4）中，针对非授权频段多用户多业务接入架构，研究了接入用户数、网络时频资源块数与网络吞吐量之间的内在关系，揭示了最大网络吞吐量的存在性和可达性，并分别提出了一种基于免触发的OFDMA MAC协议OMAX，和一种基于全双工的MAC协议FuPlex。 |
| 屈桥 | 4 | 无 | 无 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 本项目重要科学发现点2的学术思想的具体实施与实现者；代表作论文3-4的第一作者，完成了其中的理论建模分析与推导、算法设计、性能验证、论文撰写与修改等主体工作。  在科学发现点2（论文3-4）中，针对非授权频段多用户多业务接入架构，研究了接入用户数、网络时频资源块数与网络吞吐量之间的内在关系，揭示了最大网络吞吐量的存在性和可达性，并分别提出了一种基于免触发的OFDMA MAC协议OMAX，和一种基于全双工的MAC协议FuPlex。 |

1. 主要完成单位情况（不超过3个）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 完成单位 | 排名 | 对本项目主要贡献（限600字） |
| 西北工业大学 | 1 | 本项目所有完成人均隶属于西北工业大学，本项目中的重要研究发现均是在西北工业大学完成的。完成单位对本项目的主要贡献包括以下四个方面：   1. 项目资助：本项目前3位完成人：李波、闫中江、杨懋，依托西北工业大学，申请了国家自然基金项目等，其中包括支撑本项目的国家自然基金面上项目：国家自然科学基金面上项目“Ad Hoc网络中基于分布式异步带内信道预约机制的多址接入协议研究”，编号：60872045，时间：2009-2011。 2. 团队人员保障：本项目第1完成人：李波教授，在本项目研究期间，在西北工业大学招收了相关的硕博士生人员，为保障项目团队人员的稳定性提供了有力保障。其中，本项目的第4完成人屈桥，即为李波教授的研究生（包括硕士和博士阶段）。 3. 国际交流活动支持：完成单位对我们项目的国内外交流工作进行了有力的支撑，具体包括： 4. 本项目研究期间，依托完成单位，我们邀请了相关领域的国际学者、专家，开展了相关领域的国际交流，包括DajiQiao教授、Lijun Qian教授等； 5. 本项目研究期间，依托完成单位，我们参加了本领域重要的国际会议，包括Globecom、WNCN、IEEE 802.11标准会议等； 6. 本项目研究期间，依托完成单位，我们举办了本领域重要的国际会议（李波教授担任大会主席），包括ChinaCom2017、IoTaaS2018等。 7. 鼓励与相关公司研究院所的交流合作：促进了本项目的重要科学发现的推广应用。其中，科学发现点3-4已得到了国内顶级通信企业、相关研究院所的青睐和应用。 |

1. 完成人合作关系说明

本人李波是本项目的第一完成人，与项目完成人：闫中江、杨懋、屈桥共同合作完成本项目。其中，闫中江和杨懋是我团队的青年教师，屈桥是我的研究生（硕士、博士），我们共同完成了本项目重要科学发现点2和4的研究工作。下面，逐一介绍项目完成人之间的合作关系：

闫中江（合作时间：2012年1月1日——至今）：自2012年1月1日加入我主持领导的西北工业大学电子信息学院无线网络与通信实验室（WNCLAB），是我们实验室的青年教师之一，本项目的研究骨干成员之一。本项目的研究过程中，我们共同联合署名发表了代表性论文3-4和8。闫中江是本项目重要科学发现4的学术思想（空时频资源块与多业务流的优化映射机理）提出者。针对非授权频段高网络负载和密集部署环境，研究了空时频资源块与多业务流的优化映射机理，揭示出了最优业务调度策略的基本设计方法，并分别提出了一种基于时间维度和基于空间维度的多业务流优化调度策略。

杨懋（合作时间：2014年7月9日——至今）：自2014年7月9日加入我主持领导的西北工业大学电子信息学院无线网络与通信实验室（WNCLAB），是我们实验室的青年教师之一，本项目的研究骨干成员之一。本项目的研究过程中，我们共同联合署名发表了代表性论文3-4和8。杨懋是本项目重要科学发现2的学术思想（多用户并行接入最佳工作点可达）提出者。针对非授权频段多用户多业务接入架构，研究了接入用户数、网络时频资源块数与网络吞吐量之间的内在关系，揭示了最大网络吞吐量的存在性和可达性，并分别提出了一种基于免触发的OFDMA MAC协议OMAX，和一种基于全双工的MAC协议FuPlex。

屈桥（合作时间：2009年9月1日——至今）：自2009年9月1日加入我主持领导的西北工业大学电子信息学院无线网络与通信实验室（WNCLAB），是我的研究生（硕士、博士），本项目的研究骨干成员之一。本项目的研究过程中，我们共同联合署名发表了代表性论文3-4。屈桥是本项目重要科学发现点2的学术思想（多用户并行接入最佳工作点可达）的具体实施与实现者，代表作论文3-4的第一作者。