



|      |            |
|------|------------|
| 申请代码 | F010301    |
| 接收部门 |            |
| 收件日期 |            |
| 接收编号 | 6187010770 |



# 国家自然科学基金 申 请 书

(2018 版)

|        |                    |       |             |
|--------|--------------------|-------|-------------|
| 资助类别：  | 面上项目               |       |             |
| 亚类说明：  |                    |       |             |
| 附注说明：  |                    |       |             |
| 项目名称：  | 高频段通信阵列传输与广域覆盖理论方法 |       |             |
| 申 请 人： | 许威                 | 电 话：  | 13952089792 |
| 依托单位：  | 东南大学               |       |             |
| 通讯地址：  | 江苏省南京市四牌楼2号        |       |             |
| 邮政编码：  | 210096             | 单位电话： | 02552091182 |
| 电子邮箱：  | wxu@seu.edu.cn     |       |             |
| 申报日期：  | 2018年03月05日        |       |             |

国家自然科学基金委员会



## 基本信息

|          |   |   |      |  |                 |          |    |    |
|----------|---|---|------|--|-----------------|----------|----|----|
| 申请人信息    | 姓名  | 许威  | 性别   | 男  | 出生年月            | 1982年07月 | 民族 | 汉族 |
|          | 学位  | 博士  | 职称   | 教授   | 每年工作时间（月）       |          | 10 |    |
|          | 是否在站博士后   | 否   |      | 电子邮箱   | wxu@seu.edu.cn  |          |    |    |
|          | 电话  | 13952089792   |      | 国别或地区  | 中国              |          |    |    |
|          | 个人通讯地址  | 江苏省南京市四牌楼2号   |      |  |                 |          |    |    |
|          | 工作单位  | 东南大学/04信息学院   |      |  |                 |          |    |    |
|          | 主要研究领域  |   |      |  |                 |          |    |    |
| 依托单位信息   | 名称  | 东南大学  |      |  |                 |          |    |    |
|          | 联系人   | 程小易   | 电子邮箱 | xycheng@seu.edu.cn                                 |                 |          |    |    |
|          | 电话  | 02552091182   | 网站地址 | http://kjc.seu.edu.cn/webapp/KJGL_app/KJC_ZY1/inde |                 |          |    |    |
| 合作研究单位信息 | 单位名称  |   |      |  |                 |          |    |    |
|          |   |   |      |  |                 |          |    |    |
| 项目基本信息   | 项目名称  | 高频段通信阵列传输与广域覆盖理论方法  |      |  |                 |          |    |    |
|          | 英文名称  | Theory and Method of Multi-antenna Transmission and Wide-range Coverage in High-band Frequency Communications |      |  |                 |          |    |    |
|          | 资助类别  | 面上项目  |      |  | 亚类说明            |          |    |    |
|          | 附注说明  |   |      |  |                 |          |    |    |
|          | 申请代码  | F010301. 无线通信   |      |  | F010505. 移动通信系统 |          |    |    |
|          | 基地类别  | 移动通信国家重点实验室   |      |  |                 |          |    |    |
|          | 研究期限  | 2019年01月01日 -- 2022年12月31日  |      |  | 研究方向：无线通信基础理论   |          |    |    |
|          | 申请直接费用  | 72.6000万元   |      |  |                 |          |    |    |
| 中文关键词    | 高频段通信；广域覆盖；大规模多输入多输出；混合数字及模拟信号处理；信道容量   |   |      |  |                 |          |    |    |
| 英文关键词    | High-band frequency communication; Wide-range network coverage; Massive MIMO; Hybrid digital and analog signal processing; Channel capacity |   |      |  |                 |          |    |    |



|      |   |
|------|---|
| 中文摘要 | <p>新一代无线通信网络一方面需要服务海量智能化终端、提供多样的无线数据业务、支持高移动性宽带数据通信；另一方面其发展又面临着新增无线频谱资源匮乏、系统规模和成本受限等物理限制。针对此现状，深度挖掘高频段频谱和高维度空间资源并构建新型密集分布的异构协作无线网络成为极具潜力的研究方向。当前针对高频段宽带移动覆盖理论的研究还处于起步阶段，面临着诸多基础理论难题和应用技术挑战。本项目拟研究多域资源受限下广域高频段移动通信覆盖的阵列传输与协作组网的理论方法，具体包括研究高频段稀疏信道特征下自由度退化多天线矩阵信道的理论信道容量，建立高频电路器件资源受限的大规模阵列通信的性能分析方法与传输优化设计，探索改善高频段覆盖网络中通信链路可靠性和鲁棒性的方法，形成高频段协作组网覆盖下低时延、高可靠的移动终端接入策略。研究成果将为满足包括移动互联网和智慧物联网等在内的下一代通信网络新业务需求提供理论和技术支撑。</p>   |
| 英文摘要 | <p>Future wireless network aims to support massive smart terminals, various wireless services, and wideband data communications with high mobility. Meanwhile, there exists little additional spectrum resource available for the future wireless network as well as physical limits in terms of both cost and system size. Thus, it is a potential research direction to investigate the distributed ultra-dense heterogeneous cooperative wireless network by exploiting the high-frequency spectrum and high-dimensional spatial resources. The present researches on the theory of broadband mobile coverage in high-frequency band are, however, still in its infancy, which currently face many fundamental theoretical and technical challenges. This project focuses on the theory and methodology of multi-antenna transmission and cooperative network coverage in high-frequency band under resource limitations in various aspects. In particular, the research points include theoretical capacity analysis of degree of freedom degraded and sparse multi-antenna channels in high-frequency band, performance analysis and transmission design for massive multiple-input multiple-output communications under hardware resource constraints, low-latency and high reliability association strategy in high-frequency band cooperative networks, and improved reliability and robustness communication in high-frequency band networks. Outcomes of the research project are able to provide theoretical and engineering support and meet diverse requirements in future wireless communication networks including the wireless Internet and smart Internet of Things.</p> |



## 项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

| 编号 | 姓名           | 出生年月       | 性别 | 职 称 | 学 位 | 单位名称      | 电话           | 电子邮箱                  | 证件号码               | 每年工作<br>时间（月） |
|----|--------------|------------|----|-----|-----|-----------|--------------|-----------------------|--------------------|---------------|
| 1  | Xiaodai Dong | 1970-11-24 | 女  | 教授  | 博士  | 加拿大维多利亚大学 | 250-721-6029 | xdong@ece.uvic.ca     | HC341200           | 4             |
| 2  | 姜明           | 1976-05-17 | 男  | 副教授 | 博士  | 东南大学      | 13912909162  | jiang_ming@seu.edu.cn | 320113197605172416 | 6             |
| 3  | 徐锦丹          | 1992-10-25 | 女  | 博士生 | 学士  | 东南大学      | 18015647629  | jdxu@seu.edu.cn       | 320581199210254422 | 10            |
| 4  | 杜劲波          | 1991-07-08 | 男  | 博士生 | 硕士  | 东南大学      | 18051020833  | dujingbo@seu.edu.cn   | 320106199107082819 | 10            |
| 5  | 董培浩          | 1990-10-27 | 男  | 博士生 | 硕士  | 东南大学      | 18351951869  | phdong@seu.edu.cn     | 370883199010270952 | 10            |
| 6  | 赵雅琼          | 1995-06-04 | 女  | 博士生 | 学士  | 东南大学      | 15850690128  | yqzhao@seu.edu.cn     | 610302199506041525 | 10            |
| 7  | 王宇成          | 1994-02-23 | 男  | 硕士生 | 学士  | 东南大学      | 15150655157  | 220160691@seu.edu.cn  | 320281199402236513 | 10            |
| 8  | 黄谢田          | 1994-02-24 | 女  | 硕士生 | 学士  | 东南大学      | 15651629003  | 220160674@seu.edu.cn  | 420982199402246744 | 10            |
| 9  | 周少卿          | 1996-05-19 | 女  | 硕士生 | 学士  | 东南大学      | 15651926986  | yunpu1996@sina.com    | 320324199605198623 | 10            |

| 总人数 | 高级 | 中级 | 初级 | 博士后 | 博士生 | 硕士生 |
|-----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 10  | 3  | 0  | 0  | 0   | 4   | 3   |



## 国家自然科学基金项目资金预算表（定额补助）

项目申请号：6187010770

项目负责人：许威

金额单位：万元

| 序号 | 科目名称                 | 金额      |
|----|----------------------|---------|
|    | (1)                  | (2)     |
| 1  | 一、项目直接费用             | 72.6000 |
| 2  | 1、设备费                | 0.0000  |
| 3  | (1)设备购置费             | 0.00    |
| 4  | (2)设备试制费             | 0.00    |
| 5  | (3)设备改造与租赁费          | 0.00    |
| 6  | 2、材料费                | 13.00   |
| 7  | 3、测试化验加工费            | 0.00    |
| 8  | 4、燃料动力费              | 0.00    |
| 9  | 5、差旅/会议/国际合作与交流费     | 19.80   |
| 10 | 6、出版/文献/信息传播/知识产权事务费 | 9.00    |
| 11 | 7、劳务费                | 28.80   |
| 12 | 8、专家咨询费              | 2.00    |
| 13 | 9、其他支出               | 0.00    |
| 14 | 二、自筹资金来源             | 0.00    |



## 预算说明书（定额补助）

（请按《国家自然科学基金项目资金预算表编制说明》中的要求，对各项支出的主要用途和测算理由及合作研究外拨资金、单价 $\geq 10$ 万元的设备费等内容进行详细说明，可根据需要另加附页。）

课题申请直接经费共计72.6万元，预算测算理由和使用计划详细说明如下：

1. 设备费：目前课题组仪器以及计算机等相关设备齐全，不需要添加新设备。
2. 材料费：DSP和FPGA开发板用于物理层关键传输技术的单独验证，含高性能Xilinx V7芯片，约1.5万元/套，共计四套需经费6万元；另外购置高频段的功率放大器、宽带AD/DA转换模块等电子元器件和原材料约4万元；用于购置其他配件耗材，包括存储模块，开发板配件、普通电子元器件、投影耗材、硒鼓等费用3万元。**合计预算13万元。**
3. 测试化验加工费：无。
4. 燃料动力费：无。
5. 差旅费，会议，国际合作交流费：每年参加国内学术会议以及国内高校企业学术研讨会至少2次，预估平均每次2人次，四年合计16人次。每人次的交通费以及住宿费用合计预算3000元/人次，差旅费用合计预算4.8万元；计划每年组织1次的学术会议，邀请国内外本领域知名学者进行学术交流，每次会议费用约0.5万元，按四年共组织4次学术研讨会议计算，合计预算会议费2万元；课题组成员参加国际学术会议，计划每年参加领域内知名国际会议1人次，四年共4人次，按照会议注册费及国际差旅费平均每次费用2.5万元计算，参加国际会议预算10万元；四年内拟邀请境外知名专家来课题组合作交流共计两次，按平均每次1.5万元计算，预算3万元。**合计预算费用为19.8万元。**
6. 出版/文献/信息传播/知识产权事务费：课题研究发表论文所需的出版费，其中包括IEEE期刊论文版面超页费用约1500元/页，以及部分IEEE期刊论文发表的Open Access费用约8000元/篇，预计论文费用共计3万元；国内专利申请费用（2000元/项），预计10项专利2万元；国际会议论文注册费（IEEE国际旗舰和核心会议约7000元/篇），预计3~4篇国际会议约2.5万元；购买专业图书资料费、文献检索费和通信费等约1.5万元。**合计预算9万元。**
7. 劳务费：按照博士研究生平均1500元/人月，课题组每年拟招收安排博士生1名从事相关研究，按四年共安排培养4名博士研究生参与该课题研究，合计劳务费用24万元；硕士研究生每年招收安排1~2名从事算法研究与验证平台搭建工作，按600元人/月，四年共计劳务费约4.8万。**合计劳务费预算28.8万元。**
8. 专家咨询费：组织相关领域国内外专家参加学术交流会，**预算专家咨询费2万元。**



## 报告正文

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。  
请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

### （一）立项依据与研究内容（建议 8000 字以下）：

1. 项目的立项依据（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）；

#### 1.1 课题研究意义和总体目标

2017 年全球蜂窝网络所服务的移动终端数目突破 100 亿。于此同时，随着社会各行各业的发展，这些移动终端也正向着智能化、智慧化方向发展，他们业务需求多样，通常包括低时延、高速率、高可靠性等新型无线数据传输要求。预计 2017 至 2021 年间，由智能终端所产生的流量需求将增长 10 倍，对应 5 年的复合增长率接近 50%<sup>[1]</sup>。移动通信网络大约每十年就会经历一次变革换代，为满足剧增的无线数据业务需求，当前移动通信网络正处于从 4G LTE 网络<sup>[2]</sup>向下一代网络的演进和变革前夕。多个国家以及国际电信联盟（ITU）已经启动了对下一代移动通信网络包括 5G 和 IMT-2020 的技术研究和应用试验计划，如中国信息通信研究院（CAICT）率先提出的中国 IMT-2020 计划、欧盟主导的 METIS 2020 计划、韩国的 5G 论坛等。

为了能够满足日益丰富的智能业务和急速增长的通信流量需求，未来网络的变革将在物理层和网络层上同时展开，通过引入多种新技术全面提升网络性能指标。根据美国联邦通信委员会（FCC）公布的《技术及经济预测白皮书》<sup>[3]</sup>，当前可用的无线频谱资源已经十分紧张，在 6 GHz 以下几乎没有新增频段可以供移动通信网络使用，可用频谱资源严重受限成为了未来无线通信网络变革中面临的最根本挑战。因此，挖掘处于更高频段的毫米波，甚至太赫兹波和光波等频谱资源变得尤为重要，探索高频段通信的理论技术在 5G 及其后续演进网络中的应用迫在眉睫<sup>[4]-[7]</sup>。2017 年 8 月，由我国工业与信息化部倡导，IMT-2020 推进组织等在成都专门召开了“5G 高频段国际论坛暨产业推进会”，工信部相关部门、中国移动研究院、中电集团、部分高校研究所、华为和三星等一线通信企业都参加了该论坛，并介绍了各自在高频段通信领域理论研究和技术研发上的日程安排。

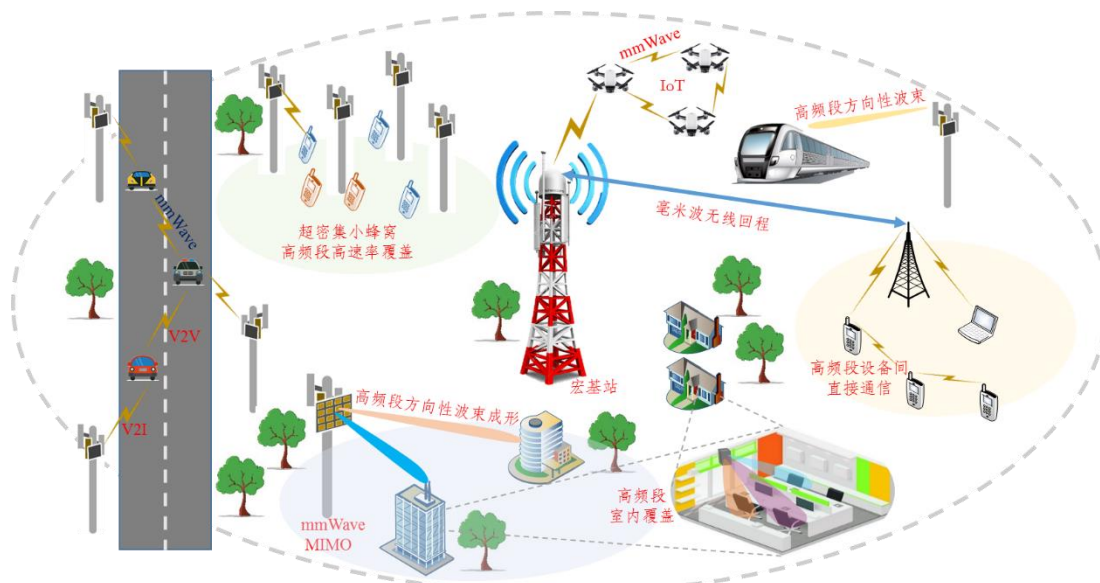


图 1. 未来 5G 密集网络中高频段协作通信示意图

目前,包括中国、美国、韩国等在内的世界多个国家已经开始为下一代移动通信系统划分毫米波频段频谱。在工业界公认的 28 GHz(严格意义上为 30 GHz)至 300 GHz 毫米波频段,预估有超过 150 GHz 以上的授权以及非授权频段可以供无线移动通信网络使用<sup>[5]</sup>,其中很容易分配到 1 GHz 以上的连续频谱,从而为实现 IMT-2020 5G 网络中 10 Gbps 以上的峰值速率要求提供可能和便利。如图 1 所示,它有望成为未来网络构架中包括分层微蜂窝、高速铁路通信网、智能车载(V2X)网络、设备间(D2D)直接通信等在内的不同层次网络的主要通信方式。此外,与现有移动通信网络中使用的厘米波频段信号相比,毫米波信号的载波波长为毫米级,由此可以极大缩小有效天线尺寸,从而毫米波通信设备可以在很小的空间范围内部署大量的天线阵子单元。由此,若将毫米波通信与多天线阵列如多输入多输出(MIMO)技术相结合,可以自然形成大规模 MIMO 通信模式,能够构造出高增益的精准波束赋形,获得可观的系统性能提升。同时,这也将有助于在天线阵列可部署空间严格受限的场景下,例如用户移动终端侧<sup>[8]</sup>,实现较大规模的天线阵列部署,从而在一定程度上实现终端侧的大规模 MIMO 技术。由于能够形成高度精准的波束赋形,这将对未来 5G 复杂网络中抑制网络干扰,提升频谱复用能力,提高无线通信安全性能起到关键作用。在一些无线通信标准和系统中当前已经开始使用或正在推进基于高频段毫米波的通信技术与方案。特别是在通信链路相对固定的无线回程传输(backhaul)、短距离慢移动性场景如 WLAN(802.11aj 等)中,基于毫米波频段的通信技术已经获得了一定程度的发展,展现出其特有的频段无需授权、通信干扰可控、传输速率高的优势<sup>[9, 10]</sup>。正是由于这些潜在优势,采用包括毫米波在内的高频段通信已经被认为是未来 5G 乃至 5G 后续演进网络中最具潜力的通信方式之一,其应用将不再局限于固定或者慢移动性小范围无线通信,而将可能作为关键技术融入未来的广域密集覆盖网络,灵活支持不同移动性场景下高速率、低时延的无线传输。





虽然高频段通信在未来广域覆盖移动网络中有着广阔的前景,但是无论在基础理论还是应用技术上包括毫米波在内的高频段通信还面临着诸多关键挑战。目前学术界和工业界都已经开始从各方面开展前期调研和探索研究工作。首先,由于现有 30 GHz 以上的毫米波通信主要是用于如军事通信、深空通信等特殊应用场景,研究人员们对毫米波在 5G 网络覆盖的复杂环境中的电磁传播特性并不十分了解。特别是在毫米波频段进行大带宽通信时,天线增益在整个信号带宽上不再近似平稳,会随着信号频率不同而发生明显变化,这将导致即便是最基本的 Friis 自由空间传播损耗模型也不再适用,从而原有的移动网络链路预算分析等都需要进行重新建模与评估。考虑到 5G 网络覆盖范围广,场景多样复杂,我们迫切需要对毫米波频段大带宽信号传播特征进行分析建模,测算高频段信号在不同覆盖范围、不同环境中的电磁波传播和穿透损耗,研究高频段下阵列天线的波束赋形增益特征、不同阵列排布下的信道相关性等。其次,在现有厘米波频段通信系统中,多天线阵列 MIMO 信道通常可以假设为(独立或具有一定空间相关性的)多元随机矩阵,根据大数定理可知,随着天线数目增加系统中多天线信道变得近似正交从而能够近乎线性地提升系统性能<sup>[11]</sup>。然而在高频段系统中,根据对高频段电磁波传播信道方向性强、多径稀疏的基本认识就可以发现此时 MIMO 信道矩阵中独立随机变量数目近似为路径传播角度变量的数目,不再随天线数目增加。这将可能从根本上改变我们对传统 MIMO 技术性能的认识,因此有必要在高频段电磁传播所展现的新信道模型下分析经典和大规模 MIMO 信道的理论容量,评估信道稀疏性所导致的系统自由度(即 MIMO 信道的高维随机性)退化对性能的影响。

进一步从应用角度考虑,随着高频段载波频率增高且信号带宽增大,构建 MIMO 通信收发机所需要的硬件成本和器件功耗都随之增加。由于电路信号频率数量级的增加,支持包括毫米波和太赫兹频段在内的高频段模拟器件的设计难度更大和制造工艺要求更高。高频元器件当前所能达到的性能指标水平和技术成熟度都与 6 GHz 以下射频器件模块存在着明显差距。然而另一方面,由于高频段通信可以支持更大规模的 MIMO 天线阵列,这使得高频段 MIMO 通信机通常需要配置更大量的功放、低噪声放大器、数模转换(DAC)单元和模数转换(ADC)单元等射频模块。因此,在可以预见的模拟器件技术发展水平下,构建高效且成本可控的高频段大规模多天线阵列硬件构架及相应的信号收发算法成为实现高频段 MIMO 通信应用所面临的一个关键挑战。为了解决此问题,目前已经有包括本课题组在内的研究人员们提出一类共享模拟射频链路模块的全新 MIMO 收发机设计构架,并引入数字与模拟混合的信号处理理论方法来平衡系统设计成本与性能。此外,能否通过配置低精度的 ADC/DAC 单元来达到减小硬件电路成本,降低系统工作功耗也是最近研究人员们关心的问题。然而,针对这些新型理论方法的研究尚处于起步阶段,在新构架下包括电路架构设计、信道估计等在内的诸多基础问题尚未探明。如何优化射频链路模块共享方案及 ADC/DAC 量化精度配置,并在新架构下形成一系列混合信号处理理论与检测方



法从而能够极大程度获得阵列增益成为有待攻克的技术难题。与此同时，为了充分挖掘高频段大量可用的频谱资源，毫米波通信的覆盖范围将拓展到未来 5G 及其演进网络的各种应用场景中。现有的毫米波通信技术由于其传播特性限制还无法对较大传输距离进行良好覆盖，也无法满足对未来网络中密集节点接入和高移动性支持的要求。当考虑毫米波通信技术通过形成高增益的窄波束来抵消传播损耗，增加网络覆盖范围时，用户位置的变化将很容易影响到通信链路的稳定性和可靠性。一旦通信链路受阻隔或用户短暂偏离波束对准方向，就会导致通信中断甚至终端掉线并需要重新接入，这将频繁增加系统开销，降低网络的时频资源利用率。因此，需要研究高频段通信网络下如何降低终端接入开销和时延，提高节点接入的稳定性，探索分布式多节点协作覆盖的理论方法，从而实现毫米波频段的广域大容量移动通信网络覆盖。

综上所述，充分挖掘高频段频谱资源，探索高频段大带宽下的毫米波 MIMO 通信理论与应用技术，实现广域大容量的高频段网络覆盖对满足未来无线通信网络在传输速率、通信时延、用户体验等多方面的更高要求起着不可替代的作用。目前，针对该领域的研究尚处于起步阶段，其中上述诸多问题也吸引着国内外学者的关注。本课题的总体研究目标将立足于毫米波 MIMO 协作通信网络的体系架构，着重研究高频段稀疏信道特征下自由度退化多天线矩阵信道的理论信道容量，建立在新型射频链路共享等硬件约束下高频段阵列通信的性能分析方法，优化高频段下超宽频谱资源分配，实现高频段通信的稳定、高速率广域移动覆盖。这些研究工作将为高频段通信应用提供理论和技术支撑，为推进我国 5G 及其演进网络的研究与发展，实现统一架构的未来宽带无线移动网络做出贡献。

## 1.2 国内外研究现状

3GPP 组织已经对当前 5G 第一阶段发展目标做出规划。根据文献[12]和[13]，5G 无线通信网络需要实现高于 10G 比特每秒的峰值传输速率、100M 比特每秒以上的用户体验速率、每平方米内多于 100 万的终端接入能力、空口 1ms 以下的端到端时延、100 倍的网络总体能效提升、以及支持高达 500 公里每小时的移动宽带连接等关键性能指标（KPI）。与前几代移动技术相比，5G 将成为更强大的统一架构来实现一个通过 5G 互联的世界，未来它将支持包括实现智慧城市、自动驾驶汽车、虚拟现实（VR）等在内的各种无线智能应用，让我们以全新方式体验生活，极大丰富我们与周围世界之间的互动形式。

目前，国内外众多研究性院校以及工业界都对 5G 技术预研及 5G 网络标准化工作给予了高度重视和大量投入。2016 年 1 月，我国就开始全面启动 5G 技术研发试验，并将 5G 的推进工作分为关键技术验证、技术方案验证和系统方案验证三个阶段进行分步实施。目前我国各大通信企业和研究院校在 5G 方面已经取得了很多优秀研究成果，对一些公认的 5G 关键技术如大规模多输入多输出（MIMO）、新型低密度奇偶校验码和极化码、软件定义网络（SDN）等都完成

了前期的基本理论分析和仿真测试，5G 网络的研发试验工作也已经推进到了第二阶段。“从 3G 时期的追赶，到 4G 时期的同步，再到如今 5G 的引领”，在 2017 年 6 月于北京召开的中国 IMT-2020 5G 峰会上，工业和信息化部副部长陈肇雄明确指出 5G 是新一代移动通信技术发展的主要方向，中国将充分发挥统筹协调和桥梁纽带作用，推动国内外产业界加强跨国家、跨地区、跨企业的深度合作，面向 2020 年 5G 商用目标加快 5G 技术的融合创新发展。国际上，3GPP 组织在 5G 标准化方面的工作也在积极推进，2016 年 3 月国际 3GPP 组织召开会议确定了针对 5G 网络接入技术即“New Radio (NR) Access Technology”的研究项目内容 (SI) [14]。这次会议上，技术报告[12]中将 5G 的典型应用场景分为三类：增强移动宽带 (eMBB)、大规模机器通信 (mMTC)，高可靠低时延通信 (uRLLC)，其中增强移动宽带场景即是针对当前 4G LTE 网络广覆盖的直接演进版本。在最近一次的 3GPP 工作组会议中，5G NR 标准化工作也将最新版本 R15 (Release 15) 的初稿确定。如图 2 所示，依照国际电信联盟关于 5G 网络推进的时间节点安排，3GPP 组织计划将在 2018 年底公布关于 R15 的最终商用标准化文档 [15]，保证 5G 网络在 2020 年实现一阶段商用的目标，并依此展开对 5G 的后续演进计划例如 NR R16 等[16, 17]的相关技术研发和标准化工作。

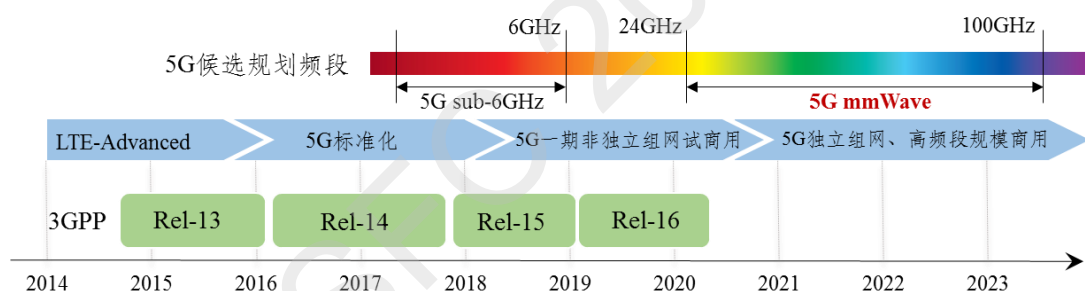


图 2. 5G 频谱规划及标准化进展与日程

为了实现 5G 网络在不同应用场景中的各项指标要求，研究人员们从物理层的空口接入到网络层的协作架构提出了一系列的潜在变革性技术，其中包括支持 3D 波束赋形的大规模 MIMO<sup>[11, 18, 19]</sup>，新型非正交多址接入技术<sup>[20, 21]</sup>，基于滤波器组的新型多载波<sup>[22]-[24]</sup>，高频段的毫米波和可见光通信<sup>[4, 5, 7][25]-[27]</sup>，云构架网络协作与密集化<sup>[28, 29]</sup>，软件定义网络<sup>[29-30]</sup>，网络功能虚拟化与网络切片<sup>[31]</sup>等。在以上这些变革性技术中，高频段通信主要是面向挖掘具有连续大带宽的毫米波和可见光波段频谱资源，旨在结合天线阵列波束赋性增益来弥补较大传播路径损耗，挖掘其实现广范围高容量覆盖的潜力。作为 5G 及其后续演进变革的关键性技术之一，针对高频段通信的研究已经展开并取得了一定的初步成果，学术界乃至工业界对其应用前景也已经达成了许多共识<sup>[9, 10, 26]</sup>。其中我国针对 45 GHz 和 60 GHz 两个频段的毫米波通信进行了标准制定和频谱划分，目前已经在 60 GHz 通信芯片设计以及 45 GHz 通信标准化制定方面取得了进展。而以韩国三星公司、美国 Verizon 等为代表的大型国际企业也对其他如 28 GHz 等毫米波频段上的无线通信覆盖进行了可行性研究和初步验证<sup>[32]</sup>。这些前期研究工



作揭示了高频段移动通信覆盖在满足未来网络需求,提升网络容量等方面的巨大潜力,极大推进了学术界与工业界对高频段通信进行进一步深入研究和发展的步伐。

国内外已经开始从多方面展开了对高频段通信的研究。作为无线通信技术发展与设计的基础,信道特征提取和信道建模始终是设计通信系统的主要依据。移动通信网络覆盖场景多样复杂,这对于高频段特别是毫米波频谱的利用是一个新的挑战。最近,文献[33]-[35]中报道了针对 6 GHz 以上的高频段载波在不同传播环境下的损耗测量和信道建模结果。其中文献[33]针对高频段大带宽信号传播特征进行了测量,给出了 73 GHz 频段电磁波的传播空间损耗和反射建模。考虑到 5G 应用中 3D 天线阵列排布,文献[34]给出了毫米波频段下立体天线阵列的空间相关性统计信道模型。3GPP 组织也已经根据部分测量数据在文献[35]中对现有基于射线跟踪方法的 SCME 信道模型进行了推广,给出了供各家企业和研究单位进行仿真验证的毫米波简化信道模型,频段范围覆盖从 6 GHz 到 100 GHz。然而与传统厘米波信号传播特征不同,毫米波频段信号更容易受到物体阻隔、大气成分乃至天气情况的影响。原有信道模型并不能对这些因素进行刻画,这对于规划毫米波通信进行室外大范围覆盖的应用而言是一个重要挑战。随着信道测量和建模工作的不断开展,现有模型正得到进一步修正<sup>[36, 37]</sup>和丰富。大量工作针对包括室外、室内以及新型物联网场景等多种环境下高频段信号的传播特征分布进行了测量与统计建模,对现有 3GPP 模型从多径空间时间分布、高频段大带宽下模型一致性、宽带天线增益模型、信道时-频-空三维统计相关特征、常见材质对各频段信号的反射和吸收损耗等方面都进行了改进和补充<sup>[26]</sup>。除了 3GPP 以外,还有包括 5GCM<sup>[38]</sup>, 欧盟的 METIS<sup>[39]</sup>和 mmMAGIC<sup>[40]</sup>在内的三个主要国际组织同时开展着面向 5G 及其演进网络的毫米波信道测量与建模工作,都取得了很多进展。于此同时,文献[41, 42]根据在纽约市区等进行的信道测量数据对不同频段毫米波波束通信覆盖的能力进行了统计分析。根据实测信道数据对毫米波频段的通信覆盖能力进行测算,研究人员们能够更准确地评估高频段通信进行大范围覆盖的能力与挑战。然而,随着电磁波频段增高至数十甚至上百 GHz 且信号带宽同时增加数倍,此时对信道的建模分析需要同时考虑多个维度上测量数据的平稳性和相关性,工作量大,技术难度也明显增加。随着测量数据和分析模型不断更新,有些数据显示高频段毫米波信道与目前常用的几类仿真模型存在着明显差别<sup>[43]</sup>,目前还没有相关模型能够得到国内外的广泛认可,从而制约了对高频段通信理论方法的深入研究。这一问题正备受关注,期待能够建立统一高效的高频段信道建模及网络覆盖分析理论。

由于高频段毫米波传播特征与现有移动网络频段信号有着明显区别,特别是在室外覆盖时面临着路径损耗严重和信道稀疏等挑战,结合多天线的毫米波 MIMO 通信技术变得十分必要。作为 4G LTE 的核心技术之一, MIMO 通信通过挖掘信号空间维度资源可以成倍提升系统容量,获得信号分集与复用增益。作为 MIMO 通信的主要优势模式之一,十余年来针对多用户 MIMO 通信的研究



从理论到应用技术已经非常广泛。代表性工作[44]证明了非线性的脏纸编码(DPC)方法可以获得多用户 MIMO 信道的理论容量界并给出了 DPC 预编码优化算法。考虑到非线性预编码算法复杂度很高且对信道估计精度要求严格,文献[45]和[46]等提出并分析了一系列线性预编码方法,这些方法计算复杂度低且能够在一定程度上获得逼近理论信道容量的性能。在现有 4G 移动网络中,多用户 MIMO 通信已经作为主要传输模式之一(TM9)被定义在 LTE 以及 LTE-Advanced 的标准中<sup>[47]</sup>。2010 年由贝尔实验室科学家 Marzetta 博士在文献[11]中提出大规模 MIMO,引起了学术界和工业界极大关注。大规模 MIMO 通过在收发信机上配备成百乃至上千天线单元,理论上可以平抑信道快衰落效应,抵消噪声,通过最简单的信号处理技术就能实现近似无干扰的多用户 MIMO 传输。虽然大规模 MIMO 在实现应用中尚面临不少挑战,其所能带来的潜在性能增益已经得到各界一致认同。2017 年四月份确定的 R14 标准化文档[48]中已经将大规模 MIMO 技术引入下一代 5G 网络。基站天线配置从原来 2 维平面天线阵列排布扩展到 3 维立体天线阵列排布,支持水平和垂直两个方向的波束赋形。基站天线数目也从原来的最大 8 天线增加至 64 天线,初步形成大规模 MIMO 技术应用框架,实现更大维度的多用户 MIMO 传输。在毫米波频段使用 MIMO 有着很多天然的优势。文献[49]详细探讨并分析了毫米波 MIMO 通信理论与经典 MIMO 技术的区别,说明了在毫米波频段 MIMO 通信不仅能够自然解决大规模天线阵列占地较大问题,而且能够充分利用 MIMO 阵列形成高增益的多方向波束实现更优的多用户 MIMO 传输,同时弥补较大的电磁空间传播损耗。此外,毫米波天线尺寸优势还使得在移动终端上配置大规模天线阵列实现双端大规模 MIMO 成为可能。我们近期发表的一篇关于毫米波 MIMO 终端设计的工作[8]获得了极高关注,根据 IEEE 期刊统计该论文单月下载量最高 6100 余次,曾入选 IEEE 全部期刊上百万论文中的月度最受欢迎论文前十位(包含所有 IEEE 期刊论文的 Top 50 Popular Documents)。下面给出了我们论文中提出的终端分布式大规模毫米波段阵列实现波束自动可调的示意图。

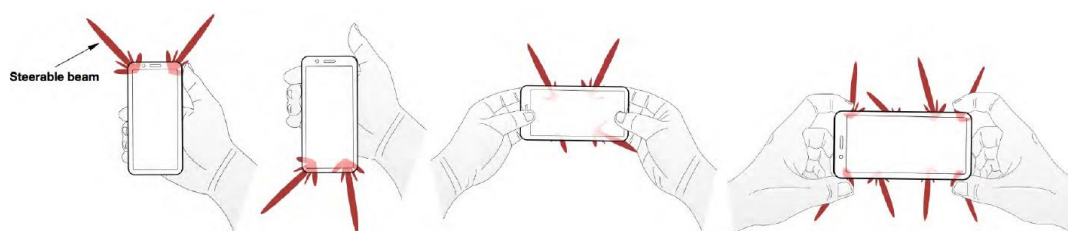


图 3. 终端分布式毫米波阵列可调波束(图选自申请人合作论文[8])

毫米波 MIMO 传输有着诸多优势。然而由于毫米波频段电磁传播方向性强、信道多径稀疏、高频器件成本较高、射频模拟单元设计难度大等与经典 MIMO 系统有着区别明显,因此毫米波 MIMO 的应用实现方案也有所区别。特别是在大规模 MIMO 中,每个天线单元都配备一套包含功放、低噪放、ADC/DAC 等在内的专用射频链路模块不仅实现成本无法接受,而且如此大量的模拟单元工作会产生巨大电路功耗。围绕这一问题,国内外研究人员主要提出了两类解决





方案。第一类方案是让所有天线单元共享一定数量的射频链路模块,通过移相器网络将射频链路单元与天线端口连接的构架。它能够在系统性能与硬件成本复杂度之间形成很好的折中<sup>[50]</sup>。该思想最初起源于无线局域网中采用纯模拟波束赋形的单数据流传输。文献[51]首次将该思想推广到了大规模 MIMO 系统中,通过配备多路射频链路模块驱动模拟移相器网络连接到天线阵列可以实现毫米波 MIMO 的复用传输。申请人课题组较早在[52]中提出了多用户通信场景下的共享射频链路结构,并从理论上证明了大规模 MIMO 下该方案可以获得与经典 MIMO 近似一致的系统容量。该论文成果入选 ESI 高引论文,且根据谷歌学术统计,2014 年 12 月该论文刊出至今已被引用 160 余次。在此基础上,[53]和[54]等指出将天线分组与射频链路模块匹配连接的设计可以在不明显损失系统性能的前提下进一步降低模拟电路单元的成本和功耗。与此同时,文献[55]提出了在毫米波大规模 MIMO 系统中采用低功耗低成本的电子开关网络来代替移相器网络的设计。然而上述新设计架构无法实现传统 MIMO 通信中的全数字预编码技术,需要针对全新构架研究具有数字与模拟混合的多用户预编码优化设计方法。包括文献[56]-[58]在内的多个研究工作针对非凸的混合预编码设计提出了各种迭代优化算法,获得了较好的性能。第二类方案则是通过采用低精度的 ADC/DAC 来替代经典 MIMO 设计方案中使用的高精度 ADC/DAC 单元来降低系统设计成本和电路工作功耗<sup>[59]</sup>。该方法可以通过配备大规模天线单元来抵消由于数模或模数量化精度降低而导致的系统性能损失。无论是经典 MIMO 信道还是毫米波 MIMO 信道下,基于低精度 ADC 的系统信道容量还没有完整的系统性理论分析结论。文献[60]和[61]等通过引入近似的量化噪声模型分析了几种典型场景下的系统性能增益。文献[62]则特别针对 1-比特量化的 MIMO 系统进行了预编码设计并分析了其渐进性能。为了更好的权衡电路成本开销与系统性能,最近的研究工作[63]和[64]提出并分析了联合配置低精度 ADC 与少量高精度 ADC 单元的混合硬件构架。上述两类解决方案为高效地实现毫米波 MIMO 通信提供了思路。然而,无论是那类结构变化都需要重新设计一系列新的信号处理方法,实现包括信道估计、数字与模拟混合多用户信号处理、低精数量化预编码优化、量化检测方法等关键通信算法。这些问题已经成为进一步推动毫米波阵列通信广泛应用所面临的主要挑战,亟待解决。

由于毫米波通信可以极大挖掘高频段频谱资源并结合大规模 MIMO 诸多优点,其能够在未来 5G 及其演进网络中实现非授权频带、超密集小区组网、物联网、车联网和室内密集覆盖等众多场景的广泛应用<sup>[50]</sup>。然而除了上所述面临的多种传输理论方法挑战,毫米波 MIMO 网络在完成通信覆盖上也面临着路径损耗大、毫米波 MIMO 波束宽度窄等问题,因此它在实现公共信道接入、用户波束对准以及移动性跟踪等网络广范围连续覆盖上也存在着很多技术难题。文献[65]和[66]研究了 60 GHz 无线接入网络中基于用户接入的资源优化分配问题。针对毫米波覆盖易被阻隔等问题,文献[67]提出了动态小区覆盖的思路,文献[68]等则提出在毫米波网络中引入中继或其他节点并通过协作通信方式来解决,同



时优化多节点协作覆盖下的用户接入策略。针对车联网场景中高速移动导致的网络拓扑变化, [69]提出了一种基于匹配理论和集群智能的分布式方案。面对不同的应用场景, 毫米波在广泛覆盖上还有很多亟待解决的问题, 毫米波系统需要形成更好更广的覆盖, 解决移动环境下的高增益波束跟踪传输, 提高毫米波 MIMO 网络覆盖的鲁棒性等都需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] Cisco, Visual Networking Index Forecast for 2017–2021, Mar. 2017.
- [2] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2009.
- [3] Federal Communications Commission, “Prepared remarks of Chairman Julius Genachowski,” *International Consumer Electronics Show*, Las Vegas, Jan. 2011.
- [4] T. S. Rappaport *et al.*, “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, May 2013.
- [5] M. Xiao, S. Mumtaz, Y. Huang, *et al.*, “Millimeter wave communications for future mobile networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 9, pp. 1909–1935, Sept. 2017.
- [6] F. Boccardi, R. W. Heath, Jr., A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, “Five disruptive technology directions for 5G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, Feb. 2014.
- [7] Z. Pi, J. Choi, and R. W. Heath, Jr., “Millimeter-wave gigabit broadband evolution toward 5G: Fixed access and backhaul,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 138–144, Apr. 2016.
- [8] **Y. Huo, X. Dong, and W. Xu, “5G cellular user equipment: From theory to practical hardware design,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13992–14010, Aug. 2017.**
- [9] S. Hur, T. Kim, D. J. Love, *et al.*, “Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 10, pp. 4391–4403, Oct. 2013.
- [10] S. Singh, M. N. Kulkarni, A. Ghosh, and J. G. Andrews, “Tractable model for rate in self-backhauled millimeter wave cellular networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 10, pp. 2196–2211, Oct. 2015.
- [11] T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.
- [12] IMT Vision, Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond, ITU-R M.2083-0, Sept. 2015.
- [13] IMT-2020 Technical Report, Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s), ITU-R M. [IMT-2020.TECH PERF REQ], Feb. 2017.
- [14] 3GPP Technical Report, “New SID Proposal: Study on new radio access technology,” RP-160671, Mar. 2016.
- [15] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith *et al.*, “5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, Jun. 2017.
- [16] M. J. Marcus, “5G and ‘IMT for 2020 and beyond’ [spectrum policy and regulatory issues],” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 4, pp. 2–3, Aug. 2015.
- [17] 3GPP Technical Report, “Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces,” TR 38.801, Mar. 2016.
- [18] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014.
- [19] F. Rusek *et al.*, “Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan. 2013.



- [20] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C.-L. I, and Z. Wang, “Nonorthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, Sept. 2015.
- [21] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis *et al.*, “A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, Oct. 2017.
- [22] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi *et al.*, “What will 5G be?” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- [23] C. J. Zhang, J. Ma, G. Y. Li, *et al.*, “New waveforms for 5G networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 64–65, Nov. 2016.
- [24] P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe *et al.*, “Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 31, no. 6, pp. 80–93, Nov. 2014.
- [25] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, “Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366–385, Mar. 2014.
- [26] T. Rappaport, Y. Xing, G. MacCartney, A. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, “Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks-with a focus on propagation models,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6213 – 6230, Dec. 2017.
- [27] **W. Xu, M. Wu, H. Zhang, and X. You, “ACO-OFDM specified recoverable upper-clipping with efficient detection for optical wireless communications,” *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 5, pp. 1–17, Oct. 2014.**
- [28] V. Jungnickel *et al.*, “The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 44–51, May 2014.
- [29] 3GPP Technical Report, “Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces,” TR 38.801, Mar. 2016.
- [30] A. Rostami *et al.*, “Orchestration of RAN and transport networks for 5G: An SDN approach,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 4, pp. 64–70, Apr. 2017.
- [31] F. Z. Yousaf, M. Bredel, S. Schaller, and F. Schneider, “NFV and SDN–Key technology enablers for 5G networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 11, pp. 2468–2478, Nov. 2017.
- [32] L. Wei, R. Hu, Y. Qian, and G. Wu, “Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 21, no. 6, pp. 136–143, Dec. 2014.
- [33] T. S. Rappaport and S. Deng, “73 GHz wideband millimeter-wave foliage and ground reflection measurements and models,” in *Proc. IEEE ICC*, Jun. 2015, pp. 1238–1243.
- [34] M. K. Samimi and T. S. Rappaport, “3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, no. 7, pp. 2207–2225, Jul. 2016.
- [35] 3GPP Technical Report, “Technical specification group radio access network; channel model for frequency spectrum above 6 GHz,” TR 38.900 V14.2.0, Dec. 2016.
- [36] G. R. MacCartney, Jr. and T. S. Rappaport, “Study on 3GPP rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications,” in *Proc. IEEE ICC*, May 2017, pp. 1–7.
- [37] K. Haneda, J. Zhang, L. Tan *et al.*, “5G 3GPP-like channel models for outdoor urban microcellular and macrocellular environments,” in *Proc. IEEE VTC*, May 2016, pp. 1–7.
- [38] 5GCM Technical Report, “5G Channel Model for bands up to 100 GHz”, Oct. 2016.
- [39] METIS2020 Technical Report, “METIS channel model,” METIS2020, Deliverable D1.4 v3, July 2015.
- [40] mmMAGIC Technical Report, “Measurement results and final mmMagic channel models,”





- H2020-ICT-671650-mmMAGIC/D2.2, May 2017.
- [41] S. Sun, G. R. MacCartney, M. K. Samimi *et al.*, “Millimeter wave multi-beam antenna combining for 5G cellular link improvement in New York City,” in *Proc. IEEE ICC*, Jun. 2014, pp. 5468–5473.
  - [42] M. K. Samimi, S. Sun, and T. S. Rappaport, “MIMO channel modeling and capacity analysis for 5G millimeter-wave wireless systems,” in *Proc. EuCAP*, Apr. 2016, pp.1–5.
  - [43] T. S. Rappaport, S. Sun, and M. Shafi, “5G channel model with improved accuracy and efficiency in mmwave bands,” *IEEE 5G Tech Focus*, Mar. 2017.
  - [44] H. Weingarten, Y. Stenberg, and S. Shamai, “The capacity region of the Gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 3936–3964, Sept. 2006.
  - [45] Q. H. Spencer, A. Lee, and M. Haardt, “Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 461–471, Feb. 2004.
  - [46] **C. Zhang, W. Xu, and M. Chen, “Robust MMSE beamforming for multiuser MISO systems with limited feedback,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 7, pp. 588–591, Jul. 2009.**
  - [47] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Academic Press, 2013.
  - [48] 3GPP Technical Specification, “LTE physical layer general description,” TS 36.201 Release 14, Apr. 2017.
  - [49] R. W. Heath, “Comparing massive MIMO and mmWave MIMO,” Presentation Material, URL: [http://www.ieee-ctw.org/2014/slides/session3/Heath-CTW\\_v6.pdf](http://www.ieee-ctw.org/2014/slides/session3/Heath-CTW_v6.pdf)
  - [50] R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. Sayeed, “An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 436–453, Apr. 2016.
  - [51] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, “Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, Mar. 2014.
  - [52] **L. Liang, W. Xu, and X. Dong, “Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 653–656, Dec. 2014.**
  - [53] S. Han, C.-L. I, Z. Xu, and C. Rowell, “Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 1, pp. 186–194, Jan. 2015.
  - [54] X. Gao, L. Dai, S. Han *et al.*, “Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 998–1009, Apr. 2016.
  - [55] R. Mendez-Rial, C. Rusu, N. Gonzalez-Prelcic, A. Alkhateeb, and R. W. Heath, “Hybrid MIMO architectures for millimeter wave communications: Phase shifters or switches?” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 247–267, Jan. 2016.
  - [56] F. Sofrabi and W. Yu, “Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 501–513, Apr. 2016.
  - [57] W. Ni, X. Dong, and W.-S. Lu, “Near-optimal hybrid processing for massive MIMO systems via matrix decomposition,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 15, pp. 3922–3933, Aug. 2017.
  - [58] X. Yu, J.-C. Shen, J. Zhang, and K. B. Letaief, “Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave MIMO systems,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 485–500, Apr. 2016.
  - [59] C. Wen, C. Wang, S. Jin *et al.*, “Bayes-optimal joint channel-and-data estimation for massive MIMO with low-precision ADCs,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 64, no. 10, pp.



- 2541–2556, Oct. 2016.
- [60] L. Fan, S. Jin, C.-K. Wen, and H. Zhang, “Uplink achievable rate for massive MIMO systems with low-resolution ADC,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 12, pp. 2186–2189, Dec. 2015.
- [61] J. Zhang, L. Dai, S. Sun, and Z. Wang, “On the spectral efficiency of massive MIMO systems with low-resolution ADCs,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 842–845, May 2016.
- [62] A. Saxena, I. Fijalkow, and A. Swindlehurst, “Analysis of one-bit quantized precoding for the multiuser massive MIMO downlink”, Oct. 2016, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1610.06659>
- [63] N. Liang and W. Zhang, “Mixed-ADC massive MIMO,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 983–997, Apr. 2016.
- [64] **J. Liu, J. Xu, W. Xu, S. Jin, and X. Dong, “Multiuser massive MIMO relaying with mixed-ADC receiver,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 76–80, Dec. 2016.**
- [65] G. Athanasiou, C. Weeraddana, and C. Fischione, “Auction-based resource allocation in millimeter wave wireless access networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2108–2111, Nov. 2013.
- [66] G. Athanasiou, C. Weeraddana, C. Fischione, and L. Tassiulas, “Optimizing client association in 60 GHz wireless access networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 23, no. 3, pp. 836–850, Jun. 2015.
- [67] H. Shokri-Ghadikolaei, C. Fischione, G. Fodor, P. Popovski, and M. Zorzi, “Millimeter wave cellular networks: A MAC layer perspective,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 10, pp. 3437–3458, Oct. 2015.
- [68] Y. Xu, H. Shokri-Ghadikolaei, C. Fischione, “Distributed association and relaying with fairness in millimeter wave networks” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol 15, no. 12, pp. 7955–7970, Dec. 2016.
- [69] C. Perfecto, J. D. Ser, and M. Bennis, “Millimeter-wave V2V communications: Distributed association and beam alignment,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 9, pp. 2148–2162, Sept. 2017.



## 2. 项目的研究内容、研究目标，以及拟解决的关键科学问题（此部分为重点阐述内容）；

### 2.1 研究目标

针对未来 5G 及其演进网络所面临的频谱资源紧缺、数据业务类型丰富、分层异构网络共存、终端移动性要求高、高传输速率和低通信时延等挑战，挖掘高频段频谱资源并建立大维度天线阵列通信系统成为解决诸多挑战、实现未来移动网络广域可靠覆盖的重要方案之一。面向采用高频段宽频谱资源的大规模阵列通信系统，本课题旨在探明高频段宽频谱通信信道的空间统计特征并形成有效的信道建模方法，考虑在高频段电子器件单元最新发展水下平台合理配置系统硬件资源，设计适合高频段大带宽信道特征的电路架构优化方案，提出高能效、低复杂度的多用户预编码优化方法。研究在高频段通信组网覆盖的框架下，形成低时延且高可靠的终端接入策略，探索通过多站点合作接入来改善高频段通信链路建立的可靠性和鲁棒性。最终，课题将从基础理论到应用技术设计形成系列的研究成果，使得高频段频谱资源能够在未来网络中得到充分挖掘和利用，为大带宽高能效的高频段通信应用算法设计和组网方案优化提供技术支撑。研究成果将有助于推进未来移动网络中高频段阵列通信的广泛使用，实现高频段异构网络广范围的鲁棒覆盖，为实现我国在下一代移动通信技术和产业中引领世界发展的目标奠定理论基础。

### 2.2 研究内容

为了实现以上研究目标，本课题将分别针对高频段阵列通信系统中的基础通信理论、传输技术设计优化、网络广覆盖实现技术三个方面展开研究。课题研究内容的整体框架如下图 4 所示。在基础理论研究部分，主要针对高频段阵列信道的高维空间特征进行建模研究，分析此信道结构下的理论信道容量和信道信息的高效获取方法；在传输技术研究部分，考虑实际应用中面临的高频段电路资源和功耗受限，结合已获得的信道建模特征，优化多用户波束赋形和复用传输等的设计方法；最后在网络覆盖研究部分，针对终端移动性和高频段信道特征，设计低时延高可靠的终端接入算法，通过优化多站点的协作接入方案，实现高频段覆盖下的移动用户稳定覆盖，满足未来网络中包括移动互联、智慧物联网等在内的各类业务需求。

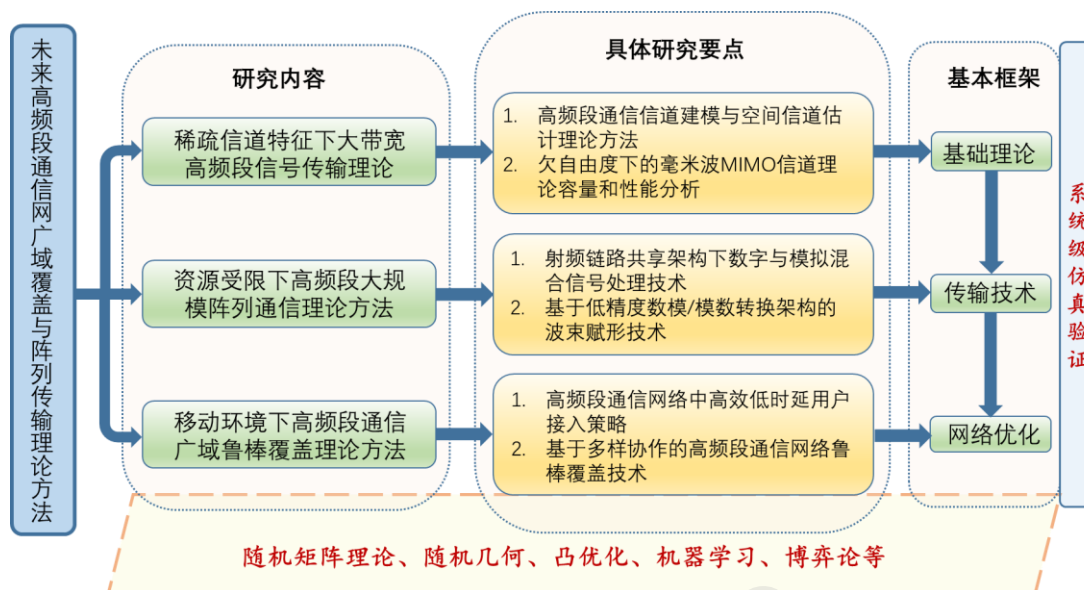


图 4. 课题研究内容逻辑框架图

### (1) 稀疏信道特征下大带宽高频段信号传输理论

准确简洁的电磁波传播信道建模是无线通信系统设计的基本前提，在现有无线通信网络发展的过程中，针对中低频段厘米波传播信道的建模已经比较完善，当前通信传输技术的优化设计大多依赖于现有的信道统计模型。在未来移动通信网络中，高频段电磁波通信展现出了引人注目的发展潜力和应用前景。除了众所周知的大尺度路径损耗严重等特点，高频段电磁波通信应用中的无线信道还具备通信带宽大、传播多径稀疏、空间阵列信道方向性强等明显特征。特别是在高频段部署大规模天线阵列进行通信时，其空间形成的大规模 MIMO 与当前系统中大部分高自由度的 MIMO 信道假设不同，由于散射及多径不丰富等原因，高频段天线阵列形成的大带宽下多天线阵列信道的空间自相关性强，信道变量自由度远小于其对应信道矩阵的维度。在高频段毫米波阵列通信中，目前主要想法是通过大规模 MIMO 利用其信道的空间相关性形成强方向性的高增益波束，在信道虚拟空间角度上对多路信号进行分辨和传输。大规模 MIMO 信道空间维度大，这对传统基于多维度统计平稳假设的信道测量方法提出了诸多挑战。虽然近几年已经有一些针对大规模 MIMO 信道建模的研究工作报告，至今尚未有被广泛认可的信道模型。而且这类信道测量建模也主要是针对当前公网中低频段展开。因此为了切实地评估高频段大规模 MIMO 通信潜在性能并优化传输设计，有必要针对特别是毫米波通信环境进行大维度空间阵列信道的测量建模，刻画其在空间波束角度方向等维度上的稀疏特性和统计概率分布。这将有助于对各类应用场景下的高频段通信系统容量进行评估和分析，为实现毫米波通信网络的广范围覆盖提供参考依据和网络部署优化策略。这部分内容主要从下面两个方面展开研究。



## ◇ 高频段通信信道建模与空间信道估计理论方法

如前所述,目前无论是针对毫米波频段还是针对中低频段的大规模 MIMO 信道测量和建模都还处于起步阶段。虽然国内外多家组织给出了信道建模的初步结果,但是对于毫米波频段目前尚没有针对大规模 MIMO 的测量或建模数据。课题将持续跟踪国内外包括 5GCM, METIS, 3GPP (TR38.901), mmMAGIC 等几大组织关于高频段通信信道测量的最新结果和信道建模报告,通过仿真和测试比较并分析各类模型在不同应用场景下对大规模天线阵列系统的适应性与性能差异。从目前测试结果可以看出即便在简单的高频段系统中应用不同信道模型仿真所得到的性能评估差异非常明显,与实际结果匹配程度也不稳定。如何针对如室内、室外、低速运动、高速运动、密集分布等场景分别选择合适的统计信道建模方法,研究大规模天线阵列不同排布下的空间信道模型推广算法,分析高频段特别是毫米波频段空间信道中直视径 (LoS) 和非直视径 (NLoS) 的统计分布,形成适合大规模毫米波阵列算法设计和仿真验证的有效模型将是本课题的主要基础研究内容,这些结果将为后续系统传输算法设计提供指导,对长期推进高频段通信网络应用有着重要的意义。

此外由于受到高频电子器件的性能与成本约束,高频段通信系统的架构也正在发生着变化,目前学术界和工业界已经开始着手研究多种不同的毫米波通信架构。与传统信道测量不同,高频段阵列通信信道的建模由此需要结合不同电路构架进行测量和分析。当系统采用阵列波束赋形进行通信时,传输设计算法会更关注信道在波束角度空间上的分辨率与统计特性。因此,传统信道建模所获得的统计特性就显得不够,也不能直接服务于高频段大规模阵列通信设计。课题有必要将现有信道统计模型转换到波束角度空间上进行分析,提取出不同场景和电路架构下的高频电磁波等效波束信道的角度统计特征。结合该特点,进一步研究毫米波通信下的终端位置与信道角度统计特性的关系,从而建立有位置辅助的信道测量和建模方法,提高系统对当前信道波束域统计特征的预测能力和探测精度。

另一方面,在现有大规模 MIMO 的研究工作中,为了绕开大维度信道矩阵估计面临的导频开销大和时延长的问题,通常考虑采用时分双工 (TDD) 的信道估计方法。然而,利用高频段信道天然的多径稀疏特征可以有效降低系统信道估计对接收信号自由度的要求,实现在频分双工 (FDD) 系统应用中的下行信道估计与反馈,更好地与当前广泛布网的 FDD 制式蜂窝系统进行兼容。因此,基于现有采用压缩感知等理论的稀疏信道估计算法,课题将针对毫米波不同天线阵列结构下的稀疏信道估计及量化反馈方法进行研究,进一步探索包括一维非线阵、二位平面阵列、三位立体天线阵列等多种类型天线阵列排布下的信道空间投影估计理论及稀疏参数估计算法。此外,由于毫米波信道链路稳定性弱,课题还将研究低时延的高频段信道跟踪与估计方法,探索 GPS 系统定位信息辅助的信道特征参数预估技术。虽然毫米波 MIMO 信道的维度通常会比低频段信



道高出许多,但是由于他们的主要直达径方向角相同,小尺度衰落的空间相关矩阵能够通过低频段信道矩阵获得。因此,利用跨频段的电磁波物理传播中的相似特征,根据已获得的低频段带外(Out-of-Band)信道信息来估计毫米波信道矩阵,实现跨频段协作信道估计也是一个值得研究的突破点。

#### ◇ 欠自由度下的毫米波 MIMO 信道理论容量和性能分析

根据前面获得的信道模型成果,课题将开展高频段特别是毫米波频段下大规模 MIMO 阵列通信的理论信道容量和可达传输速率的研究。经典大规模 MIMO 系统性能的分析主要基于独立高斯信道的假设,在天线数目足够多的场景下根据大数定理得到多用户空间信道的近似正交性,从而获得系统在大规模 MIMO 下的近似信道容量和传输性能。如上面所述,高频段电磁波传播信道分量以直达径为主,此时已经很难满足单路径信道分量独立高斯分布所需的非可辨多径散射丰富、到达角均匀分布等前提要求。此时,大规模空间信道自由度退化,其自由度的数目很低,具体数值由空间信道传播时可分辨的虚拟角个数决定。与之前独立同分布高斯信道矩阵相比,大规模 MIMO 毫米波空间信道则表征为欠自由度的高维矩阵,从而导致大数定理等渐近分析方法不再适用。课题研究需要根据信道建模与稀疏信道估计参数,分析毫米波下大规模 MIMO 信道的自由度统计特征,针对欠自由度高维信道矩阵模型探索有效的信道容量渐近分析方法,研究自由度严重退化对高维信道空间渐近正交性带来的影响,推导该场景下的系统信道容量闭式表达式或紧致容量界。特别地,针对多用户复用、多小区协作通信等不同应用场景,推导它们的理论信道容量界和可达传输速率,揭示高频段系统中天线阵列部署参数与系统性能之间的关系。据此能够量化分析信道欠自由度对信道渐近正交性的破坏程度,即可以分析由此带来的多用户干扰和小区间干扰水平上升及其对网络整体通信性能的影响,为毫米波大规模 MIMO 通信网络的部署应用提供理论参考。

毫米波通信具有另一个明显特征,即高频段上具有超过 Giga 赫兹的可用频谱带宽。考虑到高频段电磁波传播时面临相对严重的大尺度路径损耗,高速率的可靠毫米波通信一般可以通过低频谱效率但高能量效率的大带宽信号传输来实现。由此,需要研究该系统在低频谱效率传输,即低阶调制,场景下所能获得的系统可达吞吐率性能,分析此时系统所能达到的能量效率。由于低阶调制下信号已经严重偏离常用的高斯输入的假设,此时根据经典高斯输入下信道容量公式计算的结果会与实际系统传输能力之间出现较大偏差,无法准确衡量高频段大带宽传输时的系统性能,很多新问题亟待解决。加上高维度低自由度的信道矩阵特征,系统的信道容量分析难度将进一步加大,课题将从信道容量定义出发,分析并推导毫米波大规模 MIMO 信道下的低阶离散信号输入所对应的信道互信息量。最后,结合前面提到的稀疏信道参数估计方法,需要分析系统在仅有空间信道可辨虚拟角度等部分信道信息时的信道可达传输速率,揭示信道模型准确度与信道估计精度对系统性能的影响,从而可以优化系统的物理层





设计方案。

## (2) 资源受限下高频段大规模阵列通信理论方法

根据电磁波与天线设计理论, 高频段电磁波通信的天线尺寸很小, 有利于在一定空间范围内部署大规模的天线阵列, 从而通过实现高增益波束赋形来弥补高路径损耗造成的性能损失。现有移动网络中天线阵列传输设计都是采用全数字方法。实现全数字预编码需要在硬件资源上为每一个天线单元配备一套包括数模转换器、低噪放、变频器等在内的射频链路模块来驱动天线。由于高频段大规模阵列中会配置成百甚至上千天线而且通信带宽通常极宽, 因此收发端需要配备数百个射频链路和高带宽的 ADC 和 DAC。这使得硬件成本、电路功耗以及数字信号处理复杂度急剧增高, 在系统应用中难以实现, 限制了该技术的大规模推广应用。为了在系统资源可控的前提下, 实现大带宽的高频带规模性天线阵列通信, 课题需要研究硬件资源受限下的高频段大规模阵列通信方法, 优化设计新型电路构架及其传输方案, 达到减小系统功耗、硬件成本以及计算复杂度的目的。目前针对该问题主要有两类解决思路, 即通过引入移相器网络等模块实现多天线单元共享射频链路的构架, 减小硬件设计中所需要的射频链路单元, 降低硬件成本; 采用低精度的 DAC 和 ADC 单元代替传统系统中的高精度单元, 从而减小电路功耗, 降低对高带宽模数/数模转换单元的需求。这些新电路构架对系统中物理层信号处理算法提出了很多挑战, 课题将分别针对这两种新构架, 探索射频链路共享构架下的通信信号处理方法, 分析低精度数模/模数转换器对系统性能造成的影响, 评估软硬件资源开销与系统通信性能之间的折中, 从而推动高频段大带宽 MIMO 通信的广泛应用。课题将从下面两个方面开展具体的研究工作。

### ◇ 射频链路共享架构下数字与模拟混合信号处理技术

通过多天线单元共享部分射频链路模块是减小毫米波大规模 MIMO 通信硬件成本和电路功耗的重要方法之一。然而由于射频链路数的减小, 系统硬件构架上已经无法实现传统系统中采用的全数字预编码技术。为了使用少量射频链路驱动大规模天线阵列且尽可能接近最优性能, 需要引入数字与模拟混合信号处理理论来设计并优化射频链路共享构架下的 MIMO 预编码。图 5 给出了接收侧射频链路共享的模拟信号处理部分电路方案示意图, 主要包括全连接移相器网络、分块连接移相器网络、全连接电子开关网络、分块连接电子开关网络四种典型方案。在这类电路架构下, 课题将研究对应的数字与模拟混合信号处理方法优化多用户混合预编码的设计, 分析混合预编码设计下系统可达性能与经典全数字预编码性能的差异, 进一步挖掘射频链路共享架构下改进设计模拟电路方案的潜力。具体地, 由于基于数字与模拟混合信号处理技术的混合预编码设计需要基于特定的硬件结构考虑, 课题将分别针对不同的电路结构, 研究最大化系统频谱效率、最大化网络能量效率、折中电路功耗与系统性能等准则下的数字与模拟预编码联合优化方法。此外, 与经典全数字预编码不同, 混合预



编码中的模拟电路部分包含有大量分路器和合成器，这些模拟器件不可避免地会引入电路插入损耗。这一问题在现有典型通信系统传输优化时极少被考虑。电路插入损耗会对造成系统信号能量损失，且该损耗与系统电路结构中使用的模拟分路器与合成器数目有关。由于系统中混合预编码方案也是基于特定电路结构来设计的，因此有必要分别针对不同电路结构重点分析电路插入损耗对系统混合预编码性能的影响，寻求最大化系统整体性能指标下的电路结构和混合预编码联合优化方案。

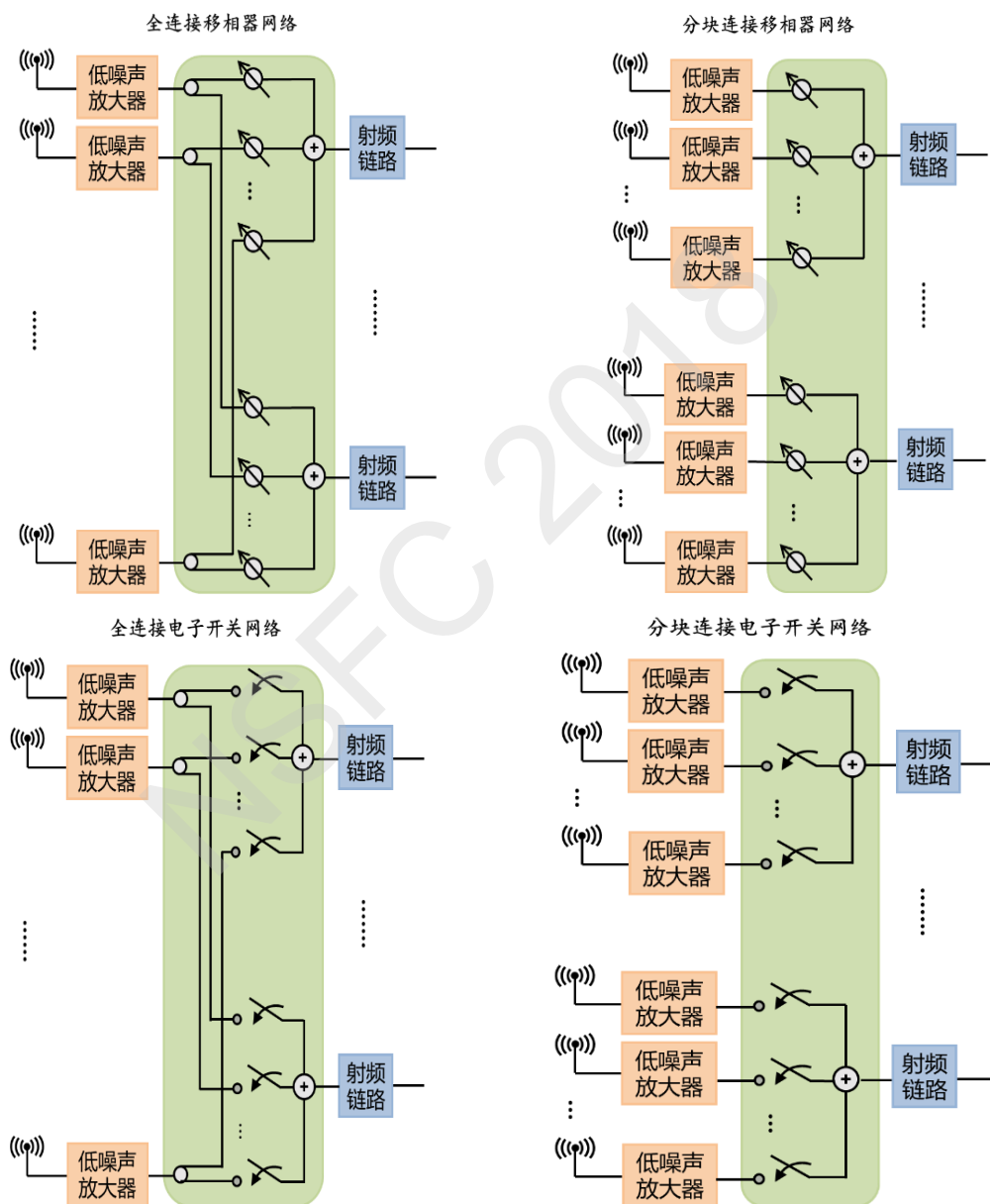


图 5. 射频链路共享接收机多种模拟网络电路逻辑图

另一方面，目前国内外已经有多个课题组针对大规模 MIMO 中的混合预编码进行了一些研究和报道。这些研究成果大多基于现有的中低频段通信系统框架设计。然而，高频段通信系统有其独有的特征，如毫米波传播信道多径稀疏；高频段可通带宽较大，毫米波频段通信带宽可以上 GHz。这些特征对混合预编





码的优化设计带来了一些新挑战。课题将研究大带宽通信条件下的多用户 MIMO 传输资源协同优化问题,考虑大带宽下的多用户调度和混合预编码的联合设计。特别在混合预编码中,模拟预编码部分通过模拟电路对信号进行移相与合并等模拟操作实现,因此混合预编码中的模拟部分只能在时域上对信号进行处理。这与现有宽带通信系统中不同,经典的全数字预编码可以在 OFDM 频率域上根据各个子带上信道状态信息分别进行优化。混合预编码系统则无法在 OFDM 中实现频率选择性的模拟预编码,从而影响多用户调度算法的设计及其通信性能。由此,针对混合构架中的模拟预编码在时域上完成而数字预编码在频域上实现的特点,课题将研究如何在所有带宽信号上优化模拟波束赋形的共享波束方向,同时根据各子带上等效信道参数构建最佳数字预编码叠加的问题,结合基于位置信息的多用户调度方法,研究利用混合架构中两层预编码的独立自由度来提高多用户波束对准的可能性和精度,从而提升大宽带下该系统的整体通信性能。

能够对抗信道信息误差的鲁棒性预编码优化一直是 MIMO 通信中的重要研究课题。在混合架构系统中,由于共享射频链路数目通常远小于天线单元数目(即独立信道参数的个数),使用数字与模拟混合信号处理的高频段 MIMO 系统中信道估计本身就是一个亟待解决的问题。对于使用射频链路共享构架的大规模 MIMO 系统,由于如前所述的系统复杂性和多样性,尚没有有效的信道估计方法。因此,本课题将研究射频链路共享架构下高频段大规模 MIMO 宽带通信系统的信道估计技术,优化信道估计方法,在保证信道估计精度的基础上,尽可能降低信道估计算法复杂度。课题研究将充分考虑混合构架中模拟信号处理部分的硬件限制,利用其特性优化设计信道估计方法,提高估计精度、降低算法复杂度、控制算法时延,做到精度与复杂度时延的平衡,并尽可能将算法推广到多种混合电路构架中。在此基础上,兼顾系统能耗与信道估计复杂度,分析混合电路架构引起的信道参数不匹配对混合预编码性能的影响,进而研究给定信道估计方法下的鲁棒性混合预编码的优化算法。这些研究成果将针对射频链路共享架构形成一系列的数字与模拟混合信号处理方法与预编码实现方案。

#### ◇ 基于低精度数模/模数转换架构的波束赋形技术

作为射频链路中的主要电路单元,ADC 和 DAC 的运行电路功耗随着信号量化比特数的增加按指数规律上升。高频段大规模阵列中需要配置大量的高精度 ADC/DAC 来实现信号的模数与数模转换,极大增加了系统的电路功耗。同时,大带宽信号对 ADC/DAC 的采样带宽也提出了比现有系统更高的要求。然而作为广泛布网的民用通信网络,在资源受限情况下,需要控制硬件成本和系统功耗。课题将研究高频段大带宽的大规模阵列系统中采用低精度 ADC/DAC 代替高精度量化单元的硬件架构,针对低精度量化信号研究对应的传输设计优化算法,分析信号量化精度在大规模高频信道下对通信性能影响,寻求系统资源成本与传输性能之间的合理折中。具体而言,由于低精度量化导致接收信号中量化噪声可能远大于背景热噪声,这使得原有针对近似理想量化设计的多用户预

编码性能难以保证。考虑低精度 ADC/DAC 对接收/发送信号进行了高度的非线性操作，需要针对新的信号量化模型优化多用户的预编码设计，分析量化预编码方案下的系统可达速率。针对低精度乃至 1 比特量化精度配置的 ADC/DAC，分别研究系统频谱效率和能量效率最大化下的多用户最优功率分配策略。特别针对毫米波大规模阵列通信下的多用户波束赋形技术，比较基于低精度 ADC/DAC 的波束赋形技术与经典理想 ADC/DAC 波束赋形之间的性能差异，平衡好 ADC 功耗与系统频谱效率等性能指标的关系。结合推导的系统性能表达式，在既定的系统传输速率指标下，给出射频链路中 ADC 和 DAC 单元的量化精度最低配置要求，揭示其与阵列天线数、负载用户数目、信噪比等系统参数之间的权衡关系。为了更有效地节约系统硬件资源，考虑在射频链路共享架构下进一步优化配置 ADC/DAC 量化精度，研究低精度量化信号下的混合数字与模拟预编码优化方法。图 6 给出了一种采用有限精度 ADC 混合构架下的大规模 MIMO 系统框图。课题将在这类电路架构下研究对应的混合信号处理方法，联合分析射频链路共享结构与低精度量化信号对系统可达性能的影响。

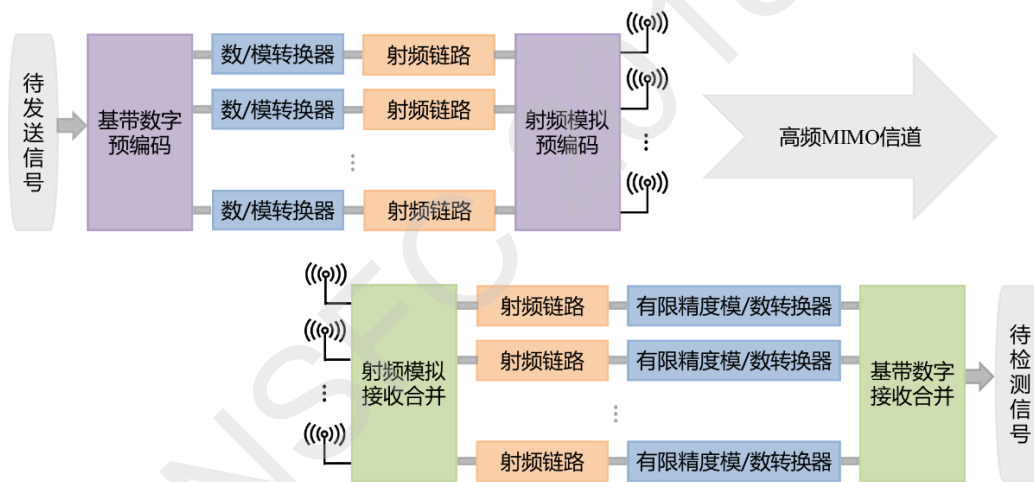


图 6. 采用有限精度 ADC 的混合构架下的大规模 MIMO 系统框图

对于低精度量化配置下的多用户预编码或波束赋形优化，目前考虑大多还是基于精确的信道状态信息的假设。然而在低精度 ADC/DAC 系统中却很难实现高精度的信道估计，若再结合射频链路共享，如前所述，信道估计方法设计本身就将面临更多挑战。由于系统从发送优化到接收检测性能都直接取决于信道估计的质量，课题需要研究不同信道估计质量对低精度量化预编码性能的影响。探索信道估计的高效设计和优化算法，尝试引入混合精度 ADC/DAC 的硬件构架，评估混合量化精度优化配置下的信道估计质量以及系统最终传输性能。充分利用高频段大规模阵列信道的稀疏性和波束方向性等特征，结合有限精度 ADC/DAC 的硬件限制，研究形成一套适应多种硬件结构的低精度 ADC/DAC 量化下信道估计方案，平衡信道估计精度与算法时延，利用大维度空间信道的渐近特征争取获得近似最佳的频谱效率或能量效率性能。在此基础上给定信道估计方法，课题还将研究鲁棒性多用户量化预编码和波束赋形设计的优化算法。



这些研究成果将针对低精度 ADC/DAC 架构形成一系列的量化信号处理方法与实现方案。

### (3) 移动环境下高频段通信广域鲁棒覆盖理论方法

为了实现与传统低频段通信相近的覆盖能力，高频段毫米波通信通过配备大规模的天线阵列实现高增益、强方向性的传输和接收波束赋形技术来克服空间大尺度路径损耗过高的问题，实现与较远距离用户之间的通信。上述研究内容(2)针对高频段 MIMO 通信链路建立后的信道估计、波束赋形等主要传输技术进行了介绍。然而系统在广播公共信道信息时，由于基站无法预知覆盖范围内的用户位置与信道信息，传统低频系统中的全向广播将无法实现广范围内的有效信息传播。稍远距离的用户会因为高频段信号经历严重路径损耗而无法收到服务区内的公共广播信息，从而不能接入服务区并完成通信链路建立。此外由于高频段毫米波易被阻隔的特点，正常通信中的毫米波链路在移动环境下也更容易被散射体和障碍物吸收阻断。用户位置快速变化极有可能引起天线阵列波束对准方向偏离，从而导致通信链路中断，甚至终端掉线而需要重新接入。因此，在高频段毫米波覆盖的通信系统中，为了实现移动环境下广范围的可靠通信覆盖，如何设计合理的公共信道信息广播策略从而保证覆盖范围内用户有效接入，研究移动用户波束对准精度的优化方法并降低波束方向跟踪时延，探索通过多样协作通信技术来提高移动用户接入效率和可靠性等，这些将是保障高频段通信网络广范围且鲁棒覆盖所面临的关键技术问题。针对该问题，课题将从两个方面开展具体的研究工作。

#### ◇ 高频段通信网络中高效低时延用户接入策略

用户接入在负载均衡、提升频谱效率和网络能量效率方面发挥着重要作用。未来 5G 及其演进网络功能丰富，对用户接入机制的设计提出了很多新的要求，特别是毫米波频段覆盖网络下的用户接入同时还面临很多基础性的挑战。针对包括同步信号、小区信息、控制信令等在内的用户接入公共信息广播，本课题将研究大规模毫米波阵列波束赋形下的公共信道的高效广播技术，优化信息广播时的波束宽度控制和波束扫描算法，在保证有效覆盖前提下通过移动性信道预测等方法实现低时延的用户接入控制。特别地，考虑到前面研究内容中涉及的混合波束赋形构架，课题研究需要重新审视新构架下毫米波 MIMO 信道的空间相关特性和混合波束赋形特点，根据新特征有必要优化设计公共信道广播波束赋形的波束码本分布，从而提高广播信道下全向波束的性能，降低用户初始接入时所需的波束码本扫描时间。此外，由于高频段毫米波传输特征与现有中低频段信号覆盖分布有着明显区别，现有 LTE-A 系统中基于接收信号强度的用户接入策略，即用户选择提供最大接收信号强度(max-RSS)的基站接入，将不再适用。课题需要研究毫米波公共信道下基于宽波束信息广播的用户接入策略，考虑结合用户自身的位置信息等来辅助选择可靠且稳定的接入点。



基于高频段毫米波的传播特征，相比于现有系统，用户移动性对此网络覆盖中的用户接入策略有着重要的影响。电磁波很难穿透比自身波长更大的障碍物，与低频信号相比，高频段链路信号对于实际场景中存在的各类障碍物阻挡更为敏感。此外，毫米波通信时形成的信号波束通常方向性强、波束宽度窄。因此，即便微弱的终端移动性都可能会导致高频段信道增益剧烈波动，通信链路可能由视距变为非视距，严重时可能造成通信中断。课题将针对移动环境下的用户接入策略和低时延小区切换算法展开研究，探索通过终端移动位置预测和波束跟踪等方法进行用户接入预测，降低用户接入切换时波束扫描带来的时延，提高高频段通信链路的稳定性。于此同时，由于毫米波基站的覆盖范围相对较小，用户的移动性也会导致基站负载波动变化加大，特别是在室内场景下，需要研究通过用户重连和服务基站切换来平衡负载。因此，课题有必要将移动性管理引入到毫米波通信覆盖的网络用户接入过程中，分析不同接入策略下网络接入点的负载分布特征和用户接入中断概率，根据分析结论针对用户业务差异性和移动性等特征，优化多站点负载均衡下的用户接入策略，从而降低用户的接入中断概率，平衡网络中各站点间的用户业务负载水平。

目前采用毫米波通信的无线局域网（如 IEEE 802.11ad）的标准化研究工作也在开展和讨论过程中。在包括 5G 在内的未来移动网络中，非授权频段的毫米波网络将会与包括无线局域网在内的各类型网络异构共存。因此，有必要研究基于高频段频谱感知的用户接入设计以便充分利用未授权的频谱资源。毫米波频段具有超大带宽的非授权频谱资源，全频段感知与公共信号广播也将占用大量的系统功率和时间资源，课题将研究基于能量效率的用户接入理论方法。充分考虑不同用户的移动性水平和业务需求类型，优化用户在授权频谱与非授权频谱之间的接入资源分配，探索非授权频谱下针对用户的高效波束探测和接入算法，实现非授权频谱下用户侧的可靠频谱感知和低时延网络接入策略。

#### ◇ 基于多样协作的高频段通信网络鲁棒覆盖技术

高频段毫米波信号对于环境因素更为敏感，严重的路径损耗和穿透损耗限制了毫米波网络的覆盖区域。以往的研究表明，用户的覆盖和可达速率可以通过增加周围基站的数目来加以提高，因此，利用密集部署的异构协作网络来达到增强覆盖是一个重要的研究方向。在现有超密集异构协作网络部署中，增加基站会带来相邻小区间干扰，复杂干扰情况可能会严重影响实际系统所能获得的网络整体性能增益。然而在例如毫米波等高频段信号的覆盖下，其波长极短可以配置大规模天线阵列，从而利用多天线技术产生高增益的窄波束。这一方面可以弥补其严重的路径损耗，另一方面也减少了波束泄露从而降低各层相邻覆盖区之间的同频干扰。由此，高频段电磁波传播中穿透损耗大、易被遮挡等特性却可以为超密集网络覆盖下的干扰控制带来新的机遇。课题将研究如何利用高频段电磁传播特性控制多层异构网络中的同频干扰，探索密集网络覆盖下基于高增益窄波束的协作传输和干扰控制方法，通过合理部署更为密集的协作网

络来提高毫米波通信覆盖的鲁棒性。具体而言,针对毫米波频段异构网络中协作多点传输,需要分析网络覆盖下的用户接入概率和通信中断概率,研究以用户为中心的多小区协作覆盖技术,减小高频段网络覆盖下的通信链路中断概率,提升小区覆盖边缘用户的网络接入鲁棒性。进一步考虑高频段通信网络的覆盖特征,即毫米波系统通常会与工作在其他频带的网络系统共存,课题将研究超密集分层异构网络中高频段毫米波基站的部署方案,兼顾不同协作网络应用中对终端接入可靠性、接入时延以及系统开销等指标要求,探索毫米波通信覆盖在新型分布式协作如设备间直接通信(D2D)等中的应用技术,利用密集网络部署和多层跨频段协作通信方式来实现高频段通信网络的广域覆盖和高速率传输。

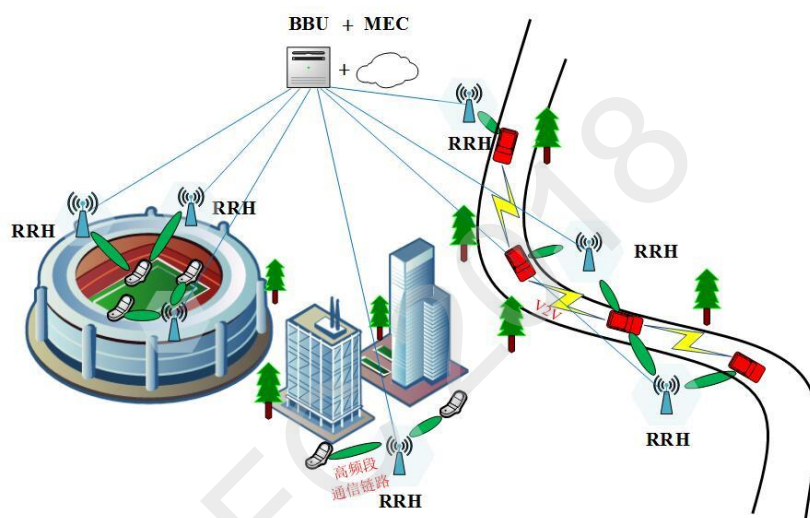


图 7. 分布式 MIMO 下的高频段协作覆盖

此外,阻挡和损耗问题也是限制高频段电磁波通信质量的重要因素,毫米波由于波长短很容易被大到建筑物小至树叶等不同尺寸物体阻隔,尤其是在车联网等高移动性应用中,正常通信的毫米波链路非常容易且频繁地被各种散射体和障碍物吸收阻断。分布式 MIMO 的系统结构为上述挑战提供了解决思路。如图 7 所示,分布式天线系统可以有效克服单链路易被阻挡的问题,保证区域内任一个地点的用户都能与至少一个远端天线单元保持近似视距传输。课题将针对分布式天线下的毫米波 MIMO 通信系统,优化高频段毫米波网络中的分布式大规模 MIMO 部署方案,考虑以用户为中心的动态网络覆盖方式,研究在包括采用中心基带池(BBU)和移动计算平台(MEC)的云接入网络(CRAN)、雾接入网络(Fog RAN)等结构下区域内多基站和接入点协作覆盖用户的动态小区形成算法。重点针对分布式 MIMO 带来的回传链路要求高、多接入点信号异步、覆盖信号时延长等问题,研究如何利用优化毫米波分布式 MIMO 结构和业务内容存储分配等来提升网络的覆盖稳定性和终端接入时延,探索对控制信号进行分布式操作,包括用于信道接入和不同频段上协作的控制信号,将部分重要控制信号如同步和信道接入请求等在微波频段上进行全方位的传输,从而降低链路信号中断概率并保证网络覆盖的稳定性。





## 2.3 拟解决的关键科学问题

为了实现本课题的研究目标，在上述研究内容中拟解决下面五个关键科学问题：

- ✧ 毫米波大规模空间信道在路径域和波束域等投影空间上的稀疏特征会引起信道矩阵自由度退化，导致常用的大数定理等渐近分析工具不再适用。需要解决欠自由度 **MIMO** 信道下大规模天线系统性能渐近分析的问题，获得简洁准确的信道容量评估表达式。
- ✧ 高频段拥有大量的可用频谱资源，但电路实现时却面临硬件资源受限。为了实现高频段大规模阵列的大带宽通信，需要解决宽带信号下混合数字域与模拟域预编码联合优化的问题，实现宽频谱信号的数字与模拟双域选择性传输，提升系统频谱效率。
- ✧ 硬件资源受限的毫米波大规模阵列通信需要引入新的射频链路共享构架和数模/模数量化单元，现有信道估计方案在新构架下不再适用，需要解决此混合构架下宽带大规模 **MIMO** 信道高效估计的问题，为系统收发侧信号处理提供有效的信道状态信息。
- ✧ 高频段信号传播路径损耗大，通信时主要通过大规模阵列形成的高增益方向性波束来弥补传播损耗。然而公共信道信息广播前无法预知潜在用户位置方向，需要解决毫米波通信网中公共信道下广播信息边缘覆盖的问题，保证覆盖区内用户都能可靠接收并实现快速接入。
- ✧ 高频段通信链路的定向性导致其对终端移动性很敏感。需要解决终端移动或周围环境快速变化下的高频段通信网络保持连续可靠覆盖的问题，通过优化终端的多站点协作接入策略来实现高频段网络移动环境下的鲁棒覆盖。



### 3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

#### 3.1 研究方法与技术路线

根据前面部分阐述的研究目标和内容，本项目的总体研究方法是拟遵循信道与系统建模、数学理论推导以及大规模计算机辅助系统级仿真验证相结合的方法，围绕未来网络中高频段阵列通信的大带宽传输与广范围移动覆盖的理论方法进行研究，针对高频段大规模阵列通信中的硬件资源受限特征提出高效的数字与模拟混合信号处理方法，优化移动环境下高频段通信覆盖的鲁棒性方案。研究过程中将根据不同研究问题的特征选择采用合适的技术研究手段和路线，最后通过系统级仿真平台进行算法验证，反馈指导下一步研究工作。图 8 中描述了本项目研究方法流程模块关系。

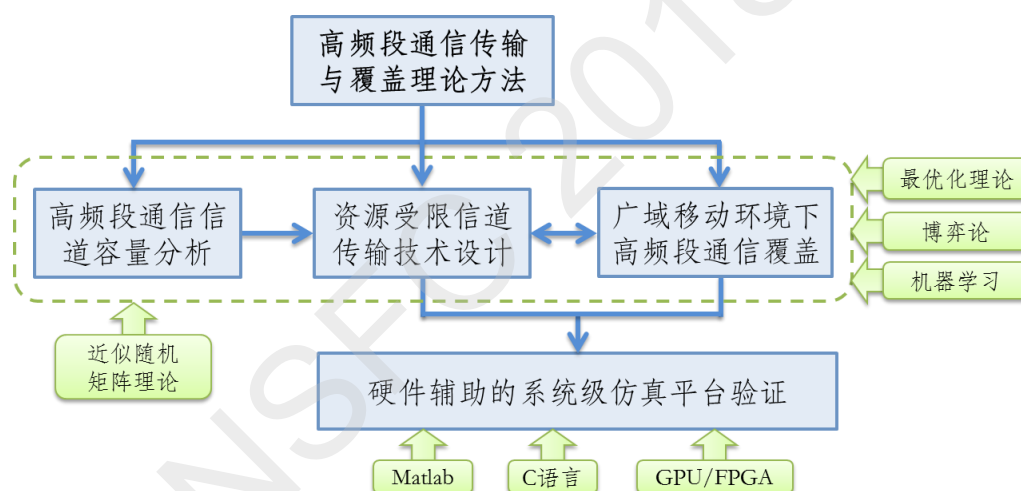


图 8. 技术研究方案逻辑图

#### (1) 稀疏信道特征下大带宽高频段信号传输理论

信道的建模与统计特性分析是无线通信理论与技术发展的重要基础。对于高频段电磁波传播模型已有大量的测试数据和建模分析，现有结果表明了高频段毫米波单通道传播链路具有路径损耗大、易被阻隔、空间多径稀疏等特征。然而，针对大规模空间阵列下的毫米波信道测量与空间信道建模尚处于研究阶段，大规模阵列会破坏信道测量数据在时、空等多维度上的平稳性，导致信道测量与建模成为一类多维非平稳信号的测量与估计问题，极大地增加了信道建模难度。项目研究将基于最新的高频段信道建模成果，提取信道统计特性，建立毫米波大规模 MIMO 欠自由度信道的参数模型，然后研究欠自由度的大维度空间信道矩阵的主动和被动（如基于带外信息）估计方法，最后从系统信噪比、信道容量与传输速率，多用户传输配置等方面分析系统的传输性能。该研究内容的研究技术路线如下图 9 所示。

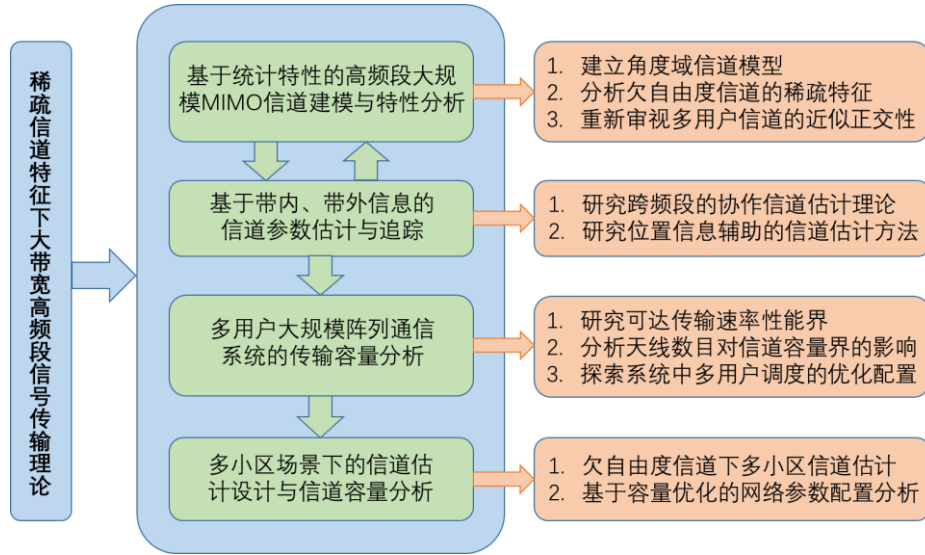


图 9. 高频段稀疏空间信道建模与传输理论研究技术路线

与传统低频段信号一致，高频段 MIMO 信道矩阵也可以采用标准的多径传播模型进行表示：

$$\mathbf{H} = \sum_{l=1}^L \beta_l \mathbf{h}_{R,l} \mathbf{h}_{T,l}^H$$

其中 $L$ 表示多径数目， $\beta_l$ 表示第 $l$ 条径的大尺度衰落因子， $\mathbf{h}_{R,l}$ 和 $\mathbf{h}_{T,l}$ 分别表示接收和发送天线阵列所对应的电磁波传播方向特征向量。若考虑典型的均匀线性分布天线阵列（ULA），对应的方向特征向量具体表示如下：

$$\mathbf{h}_{R,l} = \left[ 1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_l}, \dots, e^{j(N-1)\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_l} \right]^T$$

$$\mathbf{h}_{T,l} = \left[ 1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \varphi_l}, \dots, e^{j(M-1)\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \varphi_l} \right]^T$$

其中 $N$ 和 $M$ 分别表示接收端和发送端的天线数目， $\theta_l$ 和 $\varphi_l$ 分别表示第 $l$ 条路径信号分量的到达角和发射角， $\lambda$ 表示信号波长， $d$ 表示阵列中相邻天线之间的间隔，一般设置为 $d \geq \lambda/2$ 。

低频 MIMO 信道矩阵中，由于信道多径分量通常比较丰富，因此可以假设有大量来自不同到达角度的多径信号分量，从而由中心极限定理得知信道矩阵 $\mathbf{H}$ 近似服从高斯矩阵分布，即符合通常采用的瑞利信道假设，此时信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的自由度随着天线数目（即矩阵维度）的变大而线性增加。然而，在高频段传播信道下，由于毫米波信号的路径损耗非常大，在很多应用场景中主径分量比重极大，信道矩阵因此退化为如下形式：

$$\mathbf{H} = \beta \mathbf{h}_R \mathbf{h}_T^H$$

此时，与低频 MIMO 信道矩阵的瑞利模型不同，毫米波 MIMO 信道矩阵的每个





元素仅包含主径增益分量，显然不再服从独立同高斯分布。观察上式中信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的元素分量，可以看到即便信道矩阵维度随天线数目增加而趋于极大，其各元素不再服从独立分布，信道矩阵中所有元素都仅由直达径的发射角和到达角两个随机变量直接决定。因此，信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的自由度不再随天线数目增加而趋于无穷大，导致经典大规模 MIMO 系统性能分析所依赖的大数定理和中心极限定理不再适用。这成为了研究毫米波大规模 MIMO 的性能，例如频谱效率、信道容量等，所面临的新挑战。

根据上述分析毫米波 MIMO 信道由于角度域的多径稀疏导致信道矩阵欠自由度。需要寻找更有效的数学工具对多用户毫米波大规模 MIMO 的频谱效率和信道容量进行定量分析，探索可行的系统传输性能闭式解析方法。若考虑单天线用户终端，在上行链路中采用通用的最大比合并接收技术，基站接收信号向量 $\mathbf{y}$ 可以表示为：

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{H}^H \mathbf{n}$$

其中 $\mathbf{x}$ 为 $K$ 个用户发送的数据向量， $\mathbf{n}$ 为加性高斯白噪声， $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]$ 为上行信道矩阵。对于第 $k$ 个用户而言，其接收信号则为：

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_k x_k + \sum_{i \neq k} \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i x_i + \mathbf{h}_k^H \mathbf{n}$$

其中公式右侧第一项为有效信号，第二项为来自其他用户的干扰信息，第三项为信道噪声。在 $\mathbf{h}_k$ 维度趋于无穷的条件下，由于自由度并不随信道维度增加而变化，不能按照传统低频大规模 MIMO 性能分析中应用大数定理的思路，用户间干扰并不收敛于一个常数。研究过程中需要针对毫米波信道的稀疏特性对接收信号公式进行逐项分析，寻求分析其数学期望或者紧致界的可行理论方法。基于上述基本模型的考虑，项目研究内容的技术路线计划如下：

- 根据最新文献对毫米波多天线信道的测量数据分析，不同场景下的高频段电磁波波束信道的角度的稀疏统计特征表现并不一致。需要根据室内、室外、密集分布等多场景对建立毫米波多用户大规模空间信道的角度域参数模型。由于高频信号的路径损耗非常大，某些场景中需要忽略绝大部分的非直达径，仅保留极少的主径增益。低频 MIMO 信道在维度趋于无穷大时不同用户的信道向量内积收敛于零，因此不同用户间信道向量近似正交，这是现有系统频谱效率、信道估计研究的常用工具。而对于欠自由度的高频毫米波信道，大数定理不再适用，因此需要显式地分析此时多用户信道的正交特征变化情况。项目研究中将根据角度域信道模型中到达角概率分布，推导不同用户信道向量内积的精确数学期望，并分析信道维度趋于极大条件下的近似值。例如考虑天线阵列到达角在 $[0, \pi]$ 区间内服从均匀分布，则上述期望可以通过零阶贝塞尔函数的定义求得。进而在信道维度趋于无穷大的条件下，通过欧拉常数等式可以推导求得此期望的极限值。这些具有闭式表达形式的



期望结果将用于对欠自由度信道变量函数的计算,帮助进一步推导系统容量和可达速率性能等的表达式。

- 基于上述毫米波稀疏空间信道模型,需要研究欠自由度信道矩阵的参数估计方法,同时为了让毫米波通信能够覆盖移动终端,还需要研究稀疏信道的快速跟踪和估计方法。最近,一类备受关注的方法是尝试从带外(Out-of-Band)信息获得信道的特征参数估计。一方面对于室外毫米波通信应用而言,可以根据终端的 GPS 定位信息辅助估计阵列信道的特征参数。对于同一终端,由于天线阵列到达角相同,毫米波 MIMO 信道的欠自由度特性体现在同一基站到相同终端位置的信道矩阵参数变化微弱,由此可以通过建立终端坐标与基站间无线信道矩阵的映射关系表格来实现快速的信道估计与跟踪。另一方面对于室内等其他应用场景,需要研究跨频段的协作信道估计测量。根据不同频段信道矩阵间的统计相关性,由低频段信道统计信息来估计高频段电磁波主径传播下的统计模型参数,从而实现毫米波频段空间信道参数的跟踪预测与快速估计。
- 针对毫米波频段的多用户大规模阵列通信系统性能分析需要考虑两个重要特征,即稀疏信道所导致的高维度信道矩阵欠自由度特征、毫米波频段上极大通信带宽的低信噪比传输。由于欠自由度的多用户信道不再具备渐近正交性,考虑利用随机矩阵理论中的概率不等式来寻找并推导信道容量的紧致界表达式。针对毫米波 MIMO 系统上行链路的频谱效率,申请人团队已经对其进行了初步探索。图 10 给出了低信噪比条件下,系统上行可达速率在低信噪比时的紧致上界性能。后续需进一步探索欠自由度大规模毫米波 MIMO 系统在一般场景下信道容量性能的简洁闭式分析方法。对于双向链路,将分别考虑包括最大比合并(MRC)、迫零(ZF)、正规化迫零(RZF)等收发算法设计下的系统可达传输速率性能界,分析低信噪比下大带宽毫米波通信的性能渐近特征。特别针对多用户传输信道,分析增加天线数目对低信噪比在系统可达传输性能指标上的补偿作用。然后,根据推导获得的多用户和传输速率表达式,以每天线所能提供的数据传输速率为指标,量化分析给定天线数目下多用户接入数目对系统性能的影响。最后,研究大带宽毫米波 MIMO 系统下多天线与系统用户数目在低信噪比环境下的最优化问题。

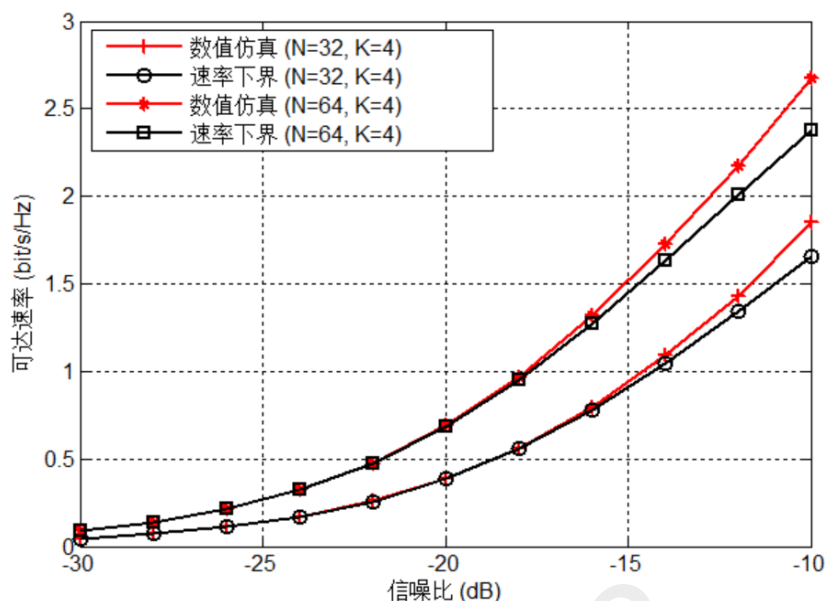


图 10. 毫米波宽带 MIMO 信道下的可达速率及其下界初步结果比较

- 进一步推广到多小区的场景，结合信道估计算法，分析导频污染对系统性能的影响。在小区内部，用户上行向基站发送正交导频信号，基站可以采用最小化均方误差准则（MMSE）估计信道矩阵。不同小区之间则复用相同导频序列，信道估计不可避免地受到其他小区用户的影响，即 MMSE 估计得到的信道矩阵中含有其他小区用户到基站的信道分量，称为导频污染。这一现象与经典多小区大规模 MIMO 中一致。然而毫米波阵列通信中，信道估计可以针对欠自由度信道的参数特征进行估计。由此，当天线数目趋于极大时导频误差由稀疏信道参数的估计误差引起，其对系统性能的影响需要利用上述欠自由度信道容量分析的结论和概率不等式方法等。在此基础上，分析导频污染对多用户系统信道容量和用户传输可达速率的影响。类似于单小区中考虑，将在多小区导频污染环境下研究确定每小区的最优用户配置算法，量化分析多小区导频长度、天线数目、用户复用传输阶数等主要系统参数对网络整体传输速率的影响，从而指导系统应用中的参数优化配置。

## (2) 资源受限下高频段大规模阵列通信理论方法

资源受限下高频段大规模阵列通信理论方法的研究工作从两个方面开展，如图 11 所示给出了该内容的研究思路框图。一方面针对射频链路共享构架，从电路构架设计、混合预编码优化、信道估计算法三个层面依次展开研究；另一方面针对低精度量化 ADC 和 DAC 方案，首先研究量化预编码的优化方法，然后分析并设计信道估计算法，最终联合优化鲁棒性的量化预编码方案。

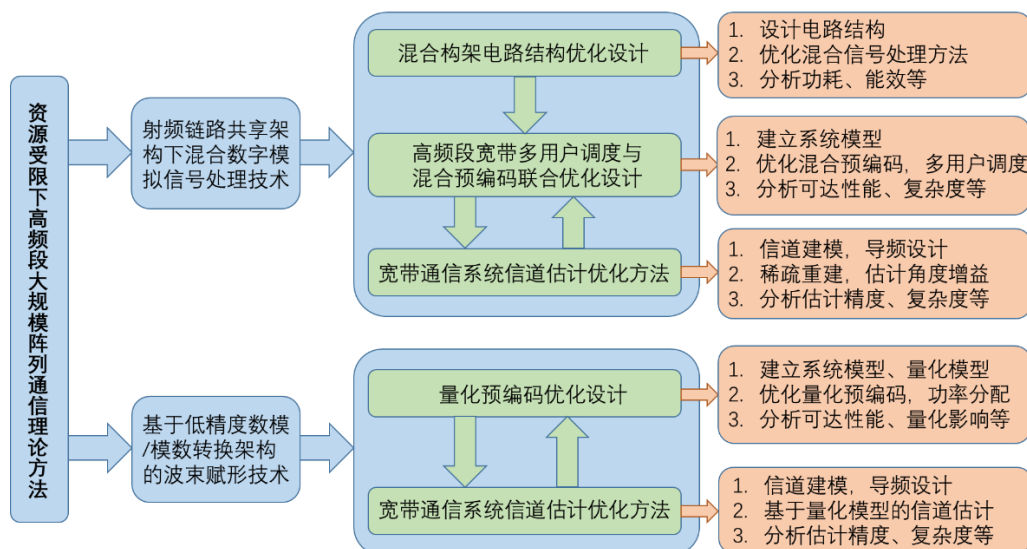


图 11. 资源受限下高频段大规模阵列通信理论方法研究技术路线

考虑系统模型采用射频链路共享架构，经典的纯数字预编码无法实现，需要有限射频链路通过模拟预编码来驱动大规模天线阵列。模拟预编码用移相器网络、开关网络或移相器开关混合网络实现，需要在系统优化模拟预编码矩阵元素时考虑不同取值限制，如移相器的单位模限制和开关的 0/1 限制等。此外，根据模拟预编码的结构还取决于系统中模拟网络电路连接方式，主要包括全连接、分组连接方式、混合链接等。下页图 12 给出了一个典型的采用收发端采用射频链路共享架构的宽带毫米波大规模 MIMO 通信系统。系统采用数字与模拟混合信号处理的 MIMO-OFDM 传输技术，假设子载波数为  $K$ ，定义  $\mathbf{F}_{\text{RF}}$  为宽带模拟预编码矩阵， $\mathbf{F}_{\text{BB}}[k]$  为第  $k$  个子载波上的数字基带预编码矩阵， $\mathbf{s}[k]$  为第  $k$  个子载波上的频域符号矢量，则第  $k$  个子载波上的时域发送信号矢量可以表示为：

$$\mathbf{x}[k] = \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}[k] \mathbf{s}[k]$$

在接收端，系统通过类似的混合信号处理方法对信号进行接收检测。定义  $\mathbf{H}[k]$ ,  $\mathbf{W}_{\text{BB}}[k]$ ,  $\mathbf{n}[k]$  分别为第  $k$  个子载波上的信道矩阵、数字基带合并矩阵、噪声矢量， $\mathbf{W}_{\text{RF}}$  为宽带模拟合并矩阵，则第  $k$  个子载波上的频域接收符号矢量可以表示为：

$$\mathbf{y}[k] = \mathbf{W}_{\text{BB}}^H[k] \mathbf{W}_{\text{RF}}^H \mathbf{H}[k] \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}[k] \mathbf{s}[k] + \mathbf{W}_{\text{BB}}^H[k] \mathbf{W}_{\text{RF}}^H \mathbf{n}[k]$$

此时，考虑进一步在射频链路共享架构下引入有限量化精度（包括低精度）的 ADC/DAC，则收发端射频链路上的信号需要使用量化模型。具体地，若发射端使用低精度 DAC，定义  $Q_{\text{DA}}(\cdot)$  为 DAC 的量化函数，则 DAC 量化后的信号矢量为：

$$\mathbf{x}_q[k] = Q_{\text{DA}}(\mathbf{F}_{\text{BB}}[k] \mathbf{s}[k])$$

若接收端使用低精度 ADC，定义  $Q_{\text{AD}}(\cdot)$  为 ADC 的量化函数，则 ADC 量化后的信号矢量为：

$$\mathbf{y}_q[k] = \mathbf{Q}_{AD}(\mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H}[k] \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}[k] \mathbf{s}[k] + \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{n}[k])$$

然后，特别针对高频段毫米波信道进行研究。为了同时体现高频段信道有限散射径与宽频带的特性，项目研究中将考虑使用几何信道模型。假设存在 $N_p$ 条径，定义 $\alpha_l, \tau_l, \varphi_l, \theta_l$ 分别为第 $l$ 条径的复数增益、时延、到达角、发射角，定义 $p(\tau), \mathbf{a}_R(\varphi_l), \mathbf{a}_T(\theta_l)$ 分别为带限脉冲成型滤波器、接收机天线阵列响应矢量、发射机天线阵列响应矢量，则第 $d$ 个时延抽头上的信道矩阵可以表示为：

$$\mathbf{H}_d = \sum_{l=1}^{N_p} \alpha_l p(dT_s - \tau_l) \mathbf{a}_R(\varphi_l) \mathbf{a}_T^H(\theta_l)$$

定义脉冲成型滤波器 $p(dT_s - \tau_l)$ 在第 $k$ 个子载波上的频率响应为 $w_l[k]$ ，可以得到第 $k$ 个子载波上的信道频率响应矩阵为：

$$\mathbf{H}[k] = \sum_{l=1}^{N_p} \alpha_l w_l[k] \mathbf{a}_R(\varphi_l) \mathbf{a}_T^H(\theta_l)$$

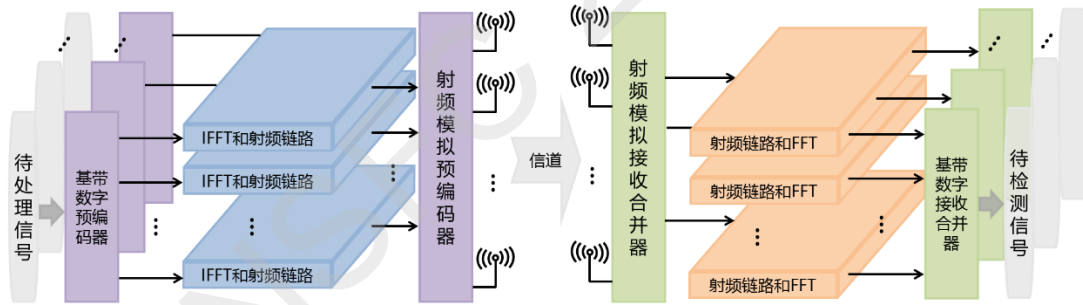


图 12. 资源受限下高频段大规模阵列通信理论方法研究思路框图

从上面系统模型公式中可以看出，与经典的纯数字预编码相比，射频链路共享架构下混合预编码中的数字预编码矩阵维度将大大降低。此外，主要区别还在于混合构架下数字预编码部分不是对信道直接操作，而是对模拟预编码与信道乘积的等效信道操作。对于高频段大带宽多载波通信系统，混合预编码比经典预编码设计面临着更多的挑战。经典的纯数字预编码在 OFDM 频域上可以对不同子载波根据各自的信道状态信息分别进行优化设计；而对于混合预编码，我们考虑到模拟预编码部分是在时域上操作的，无法实现频率选择性的优化设计，只有数字预编码部分可以在各子载波上分别优化。另一方面，考虑使用低精度 DAC/ADC，则传统的基于无限精度 ADC/DAC 的波束赋形技术也很难实现，需要引入量化波束赋形技术。基于上述基本模型的考虑，本项目研究内容的技术路线如下。

- 首先对各类电路结构建立相应的矩阵形式系统模型，充分考虑混合架构中模





拟信号处理部分矩阵元素的取值限制。然后针对不同的电路结构联合优化数字与模拟预编码方法,考虑基于最大化频谱效率、最大化能量效率等不同准则下的混合预编码优化问题。由于模拟预编码部分的电子元器件特性限制,混合信号处理的优化问题往往是一个非凸问题,考虑通过变量松弛等方法将问题转化为凸问题求得,需要证明该松弛方法能否保持优化结果的最优性。进一步分析比较各类电路结构下系统的频谱效率、能量效率,其中系统功耗的计算要求我们建立精准合理的功耗模型来包含所有电路模块的贡献。最后,混合预编码的性能分析需要重点考虑模拟电路网络中信号插入损耗对系统性能的影响,切实分析并比较不同电路架构下的可达性能,进而寻求特定要求下最优的电路架构以及对应的混合信号处理方案。

- 针对高频段宽带大规模阵列通信系统,考虑多用户调度以及混合预编码的联合优化设计。根据宽带下混合预编码特征,需要针对调度的多用户设计统一的宽带预编码,而多用户数字预编码则可以针对各子载波分别优化。研究中,将考虑首先设计面向统一模拟预编码的多用户调度算法,然后对产生共享波束方向的模拟预编码分别调整数字波束方向抑制多用户干扰,使得系统频谱效率最大化。类似的,需要考虑采用变量松弛、对偶优化等方法将联合优化问题转换为等价的凸问题,尝试寻找系统最优解。最后分析联合优化的多用户调度及混合预编码方案的性能,揭示宽带混合预编码对系统多用户调度性能的特征。
- 对于射频链路共享构架下高频段宽带大规模阵列通信系统的信道估计问题,需要充分利用高频段宽带信道在虚拟角度域和多径时延域的稀疏特性。通常可以将几何信道模型转化为由等间隔发射角/接收角和等间隔时延决定的具有稀疏特性的信道表示,从而将信道估计问题转化为稀疏信号恢复问题,接着估计稀疏信号非零元素位置即对应稀疏路径的发射角/接收角,常用方法如正交匹配追踪、压缩感知等。我们需要进一步考虑在时域和频域分别进行信道估计,比较不同方案和系统参数下信道估计的精度,并基于此结合前面工作开展混合数字与模拟预编码的鲁棒性优化设计。
- 对于使用低精度 ADC/DAC 的高频段大规模阵列通信系统,首先研究经典的纯数字预编码/检测如 ZF 预编码/检测在低精度 DAC/ADC 量化效应下的可达性能,可以用 Bussgang 分解理论将非线性量化操作表示为线性函数,利用随机矩阵、数理统计、概率论等理论工具进行信干量噪比 (SIQNR)、可达速率等系统性能指标的推导,进而量化分析 ADC/DAC 精度对可达性能的影响,给出系统期望可达速率性能下的 ADC 和 DAC 精度折中关系。该场景下的信道估计问题,同样需要利用高频段信道在角度域和时延域的稀疏特性,考虑更符合实际的量化模型,充分利用量化器输出元素间的空间相关性,优化设计低复杂度高精度的信道估计算法。考虑将算法根据量化模型进行修正,从而形成一套复杂度与精度相平衡的通用信道估计方法。

目前，针对射频链路共享新构架下的预编码优化设计，申请人团队已经开展了初步研究工作。我们给出了特定电路构架下系统预编码部分统计特性的表征变化，并根据新的统计特性优化了预编码的码本设计，取得明显的系统性能增益，如下图 13 所示。

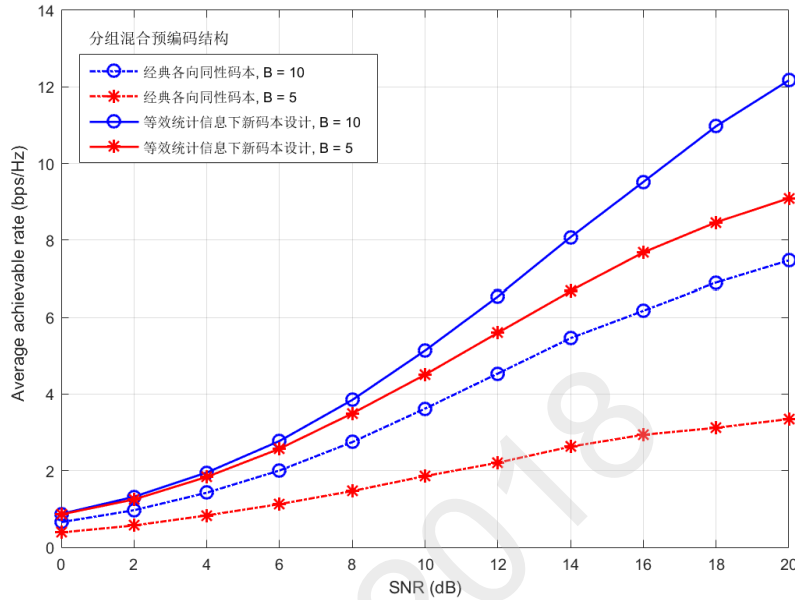


图 13. 结果整理自申请人团队近期论文（2017 年 12 月 Globecom 上宣读）

### (3) 移动环境下高频段通信广域鲁棒覆盖理论方法

因为高频段毫米波通信链路具有路径损耗严重、容易受到阻挡等独特的信道特征，毫米波信道在视距（LoS）和非视距信道（NLoS）下具有完全不同的传播特征。在网络覆盖中，特别是移动用户所经历的无线信道会表现出在 LoS 与 NLoS 特征之间频繁地迅速切换，因此需要考虑基于概率模型的毫米波传输模型。在毫米波网络系统级性能分析中，常用的方法是采用简单而精确的 LoS 球模型来分析网络中视距和非视距通信链路的概率。基于 LoS 球模型，LoS 链路的概率是基站与用户之间距离 $r$ 的函数，具体如下：

$$P_{LoS,\xi}(r) = \begin{cases} e^{-\beta r}, & 0 < r < R_{\xi} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中， $\xi = m$ 表示宏基站， $\xi = s$ 表示微基站， $\beta$ 表示路径中的阻挡损耗，由障碍物的密度和尺寸决定。显然，NLoS 链路的概率为 $P_{NLoS,\xi} = 1 - P_{LoS,\xi}$ 。相比于中低频信号而言，毫米波信号的路径损耗更为严重，在标准的对数距离路径损耗模型下，其路径损耗具体可表示为：

$$PL_{\xi} = 10\delta \log_{10}(r) + \beta + S_{\sigma}$$

其中， $\delta$ 表示路径损耗指数，LOS 和 NLOS 信道应该采用不同的损耗指数， $S_{\sigma}$ 是

阴影衰落。基于此链路传播模型，本项目将研究高频段通信中对移动终端的广域鲁棒性覆盖问题。研究思路如图 14 所示，拟首先采用上述模型对毫米波异构网络进行建模，然后根据网络特征以及优化指标建立优化问题，探索时延约束下用户接入策略的优化方法，最后通过分析不同场景中基站负载分布以及覆盖中断概率等统计特征，从而为高频段通信覆盖的组网优化提供依据。

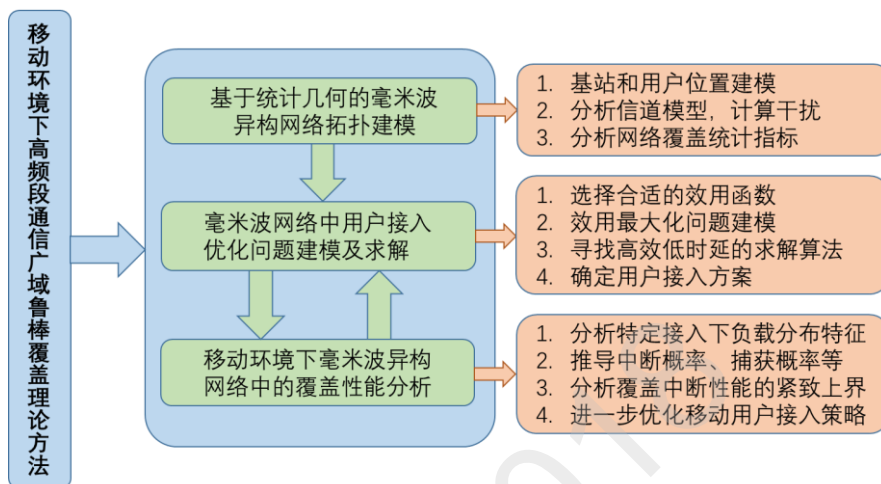


图 14. 移动环境下高频段通信广域鲁棒覆盖理论方法研究研究技术路线

考虑一个典型的毫米波通信异构网络应用中配置多天线阵列。根据标准二维扇区天线模型来估计阵列增益，即在主波束范围内所有角度上天线增益均为常数，用户和基站之间可通过波束对准获得最大方向性天线增益。有效的天线增益可表示如下：

$$G_{\xi}(\theta) = \begin{cases} G_{\max,\xi}, & \theta \leq \frac{\theta_{\xi}}{2} \\ G_{\min,\xi}, & \text{其他} \end{cases}$$

其中， $G_{\max,\xi}$ 和 $G_{\min,\xi}$ 分别表示主波束增益和旁瓣波束增益， $\theta$ 是基站与用户间实际波束瞄准方向的角度偏差， $\theta_{\xi}$ 是基站的波束宽度。假设分层异构网络中接入站点的发射功率相等，则在毫米波链路中用户接收到特定基站的功率为 $P_r = P_{\xi} + G_{\xi}(\theta) - PL_{\xi}$ （ $P_{\xi}$ 和 $G_{\xi}(\theta)$ 单位为 dB）。

有限资源约束条件下的效用最大化问题是下一代，如 5G，移动网络中研究用户接入的通用建模方法。由此，高频段网络中优化用户接入的问题可以表示如下：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{X}} \quad & \sum_i \sum_j x_{ij} U(x_{ij}) \\ \text{s. t.} \quad & f_i(\mathbf{X}) \leq c_i, \quad \forall i \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{X}$ 是用户接入矩阵， $x_{ij} = 1$ 表示用户 $i$ 接入基站 $j$ ， $x_{ij} = 0$ 表示用户 $i$ 不由基站 $j$ 提供服务，约束条件表示频谱、功率等资源限制或服务要求（QoS）， $U(\cdot)$





是根据实际研究指标选择的效用函数，常用的效用函数有对数、指数和反曲函数等。

为了得到毫米波异构网络中最优的用户接入和负载均衡的性能，考虑利用统计几何工具进行分析。首先根据初步接入情况确定典型基站的负载，基站负载定义为接入该基站的用户的平均数量，用 $L_\xi$ 表示。假设基站侧分配到的频谱资源为 $W_\xi$ 。依据香农容量定理，网络的最大可达速率可以表示为：

$$R = \frac{W_\xi}{L_\xi} \log_2(1 + \text{SINR}_\xi)$$

由上述系统容量表达式，可以分析典型用户的有效覆盖概率（Coverage Probability），或者分析对应终端接收 SINR 高于既定信干噪比门限的 SINR 覆盖概率。类似地，速率覆盖概率定义为网络最大速率高于速率门限的概率，数学表达式为 $P_c \triangleq \Pr(R > \delta)$ ，其中 $\delta$ 为速率门限。根据毫米波信号的信道传播特征，利用统计几何（Stochastic Geometry）以及随机概率理论可以推导网络中站点负载分布和网络覆盖概率的解析形式。具体研究路线包括下面三点：

- 考虑到毫米波链路独特而复杂的信道特征，拟采用统计几何方法来建立高频段毫米波网络的系统拓扑模型。统计几何学考虑了网络几何的拓扑随机性，主要用于随机拓扑的网络中的建模、分析和设计，非常适用于分析包括毫米波通信在内的异构网络系统级性能。基于网络特征，首先假设毫米波网络中各层基站和用户的位置服从某种点过程分布，常用包括齐次泊松点过程，根据各层不同的小区半径和密度可以获知不同应用模型下分层网络中站点及终端的位置分布统计关系；然后结合 LOS 球模型、对数距离损耗模型以及扇区天线模型等可以得到毫米波信道中的阻挡损耗、视距与非视距链路的概率、路径损耗以及天线增益等具体计算表达式，进而能够得到毫米波通信网络覆盖下的各节点与接入站点之间的信号与干扰关系；最后根据得到的显式关系表达式来分析具有不同拓扑特征的网络覆盖统计指标。
- 具体针对高频段异构网络中用户接入和负载均衡的问题，课题考虑在基于随机几何分析的结论基础上建模基于效用函数的优化接入问题。在决策问题中，效用函数通过对用户对决策满意度的量化，可以优化获得用户满意度最高的决策方案。效用函数被广泛用于用户接入问题的建模中，课题首先需要根据毫米波网络覆盖的应用类型来选择合适的效用函数，将高频段网络中用户接入问题建模为有限资源约束条件下的效用最大化问题。考虑到同步和减少信令开销等问题，用户接入选择的建模通常会得到一类组合优化问题。虽然理论上穷举法可以最优地求解该问题，但即便对于中小规模的移动网络，其计算复杂度和接入时延都是不可接受的。需要结合采用博弈论、组合优化、随机几何学等数学工具来寻找低时延的高效用户接入策略。常规路线是尝试通过对矩阵变量寻找合适的放缩方法将原问题转化为凸问题，然后再求解。

然而在毫米波通信中网络覆盖类型复杂,如车联网络等很多应用中对接入时延和覆盖稳定性都有较高的要求。因此为了控制信令开销,降低接入时延,课题拟引入机器学习中基于高速统计采样的优化方法,并结合统计概率中的交叉熵(Cross Entropy)理论来设计高效的接入算法。图 15 给出了项目团队最近通过引入机器学习方法提出的一种用户接入算法的性能,通过在典型异构网络下的仿真比较,可以看出该方法可以获得接近于最优的接入算法性能。而该算法在计算复杂度、用户接入概率的快速建模、充分利用网络先验接入状态等多方面都具备潜在优势。课题组正在对该理论方法进行深入研究,探索其在高频段覆盖的复杂异构网络接入优化中的推广和应用。

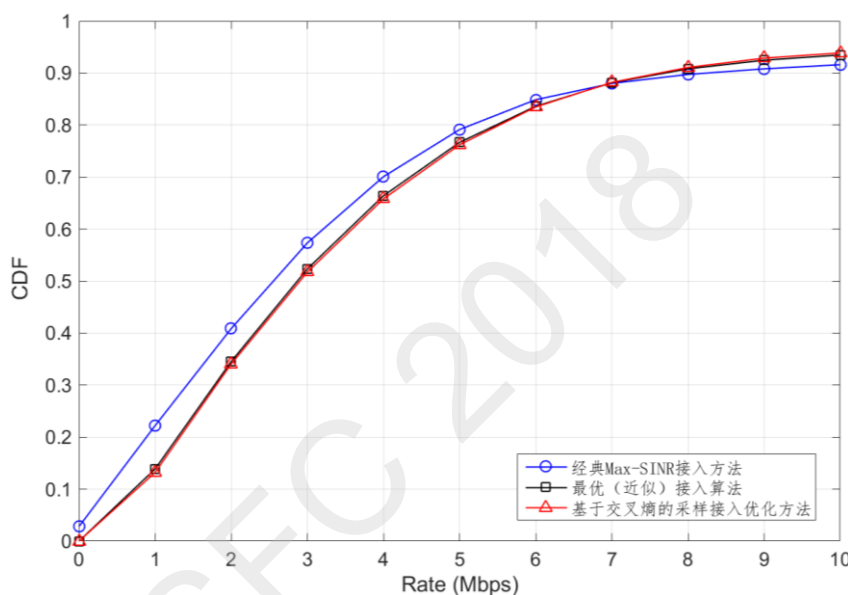


图 15. 基于机器学习的交叉熵采样接入优化算法性能比较

- 阴影衰落和阻挡造成的信号泄漏是制约高频段毫米波通信性能的主要因素,特别是在移动时变环境下,终端位置的微小改变可能会导致毫米波信道增益的剧烈波动,通信链路可能由视距变为非视距,这会导致基站负载波动变化加大,严重时还可能造成通信链路中断。课题研究中将利用统计几何方法分析移动性环境下毫米波异构网络中的覆盖性能,并对移动性环境下的用户接入策略和低时延小区切换算法展开进一步优化。首先,利用上述第二点得到的优化结果确定基于大尺度衰落信道状态信息下的用户接入情况;其次,分析特定接入策略下异构网络中各基站的负载分布特征。由于不同应用场景中视距链路的概率不同,因此需要根据不同情况下的统计特征分别讨论;接着,增加考虑小尺度衰落信道特征和移动性环境特征,分析网络中典型用户的中断概率,由网络中终端的接收信干噪比表达式推导出中断概率、捕获概率等性能指标的解析形式。研究面临的主要难点是移动环境造成的信道时变性使得毫米波网络中的负载分析变得困难。因此需要考虑系统模型的适当近似,通过分析网络覆盖中断性能的紧致上界来合理评估系统覆盖性能;最后,根据此分析用户移动性对网络覆盖中断性能的影响,优化多站点负载均衡和移



动用户的接入策略。

### 3.2 可行性分析

近几年来,学术界已经开始开展关于高频段毫米波通信理论与应用的研究,如前第一部分所述,在各方面都已经取得了一系列的研究成果。本课题组在与此相关的毫米波通信、大规模 MIMO 领域也取得了前期研究成果,在此过程中形成了一套可借鉴的有效分析思路和方法。本项目将依托现有的研究结论和成果,充分考虑高频段通信中大带宽、稀疏信道、新电路构架、移动覆盖等特征与需求对上述研究内容进行分析与研究。以上研究思路与路线都是在进行了相当的前期调研,积累了一定的研究成果后制定的,可以确保项目研究计划切实可行。

申请人团队将依托东南大学移动通信国家重点实验开展相关研究。项目成员具有良好的研究基础和科研能力。长期以来,申请人一直专注于无线通信系统中的多天线阵列通信与协作通信理论技术研究,相关领域已经发表学术论文近 100 篇,其中在 IEEE 通信与信号处理领域的多个期刊上发表 SCI 检索论文 60 余篇,多篇关于大规模阵列通信的论文获得了 IEEE Globecom、IEEE/CIC ICC 等国际会议的最佳论文奖,2 篇论文入选 ESI 高引论文,以及多篇论文曾入选 IEEE 期刊月度最受关注论文 (Top Popular Documents) 等。作为国际上早期针对大规模阵列中混合数字与模拟预编码的研究论文成果之一,申请人的一篇合作论文受到了国内外学术界与工业界的持续关注,2014 年发表至今被引用 160 余次 (谷歌学术)。申请人课题组在多天线阵列通信、协作通信、毫米波通信领域有着良好的理论基础和技术储备。申请人此前还作为主要成员参与过国家重点基础研究发展计划 (973 计划)、国家重大科技专项、加拿大研究主席计划 (Canada Research Chairs Program)、加拿大国家自然和工程研究委员会计划 (Canada NSERC) 等科研项目。在技术应用研究方面,承担过与多家国际知名电信企业如爱立信、华为、NEC、中兴等在多天线和协作通信技术方面的合作研究。这些研究经历将有益于我们进一步研究高频段毫米波下的多天线阵列通信与协作覆盖理论方法。特别的,在针对新型分组式射频链路共享架构的毫米波通信性能分析方面,申请人团队已经取得了一些初步成果。该成果在最近一次召开的 IEEE 通信学会旗舰会议 Globecom 上进行宣读。另外,目前团队已经搭建完成面向 LTE-A 协作通信网络的系统级仿真平台。此平台各项基本测试指标都与 3GPP 公开的系统级仿真校准要求吻合,这为我们进一步开发未来毫米波异构网络的系统级仿真平台提供了重要基础。这些先期成果为本课题的顺利开展奠定了坚实的基础。

基于上述情况,我们认为本项目所涉及的对高频段通信阵列传输与广覆盖理论和应用技术的研究技术路线具备可行性。课题组相信完全能够完成本项目拟定的研究目标和各项研究内容。



#### 4. 本项目的特色与创新之处；

针对包括毫米波在内的高频段通信理论与技术的研究是近年来面向未来移动通信网络关键技术研究热点，已经引起了学术界和工业界的持续关注，在各方面也取得了一定的研究成果。在此基础上，本项目将重点关注基于大规模阵列的高频段通信理论方法，从而实现高频段通信网络对移动环境的广域协作组网覆盖。本项目的特色与创新之处归纳如下：

- 1) 针对高频段电磁传播信道稀疏所导致的 **MIMO** 信道矩阵欠自由度这一特点，给出分析大规模欠自由度 **MIMO** 信道下信道容量的渐近分析理论和方法，利用随机矩阵不等式推导获得信道容量界的简洁表达式，给出高频段阵列通信系统在大规模天线配置下的可达传输速率界和系统的渐近能效性能，为系统设计提供理论支撑。
- 2) 研究资源受限下的高频段毫米波大规模天线阵列通信理论，给出面向高能量效率的系统射频链路共享方案。通过信道空间特征分析，提出适合射频链路共享新构架的基于空间特征投影的分步信道估计方法，并针对该新构架提出优化混合数字与模拟多用户预编码的算法。
- 3) 利用统计分析理论和巴桑（Bussgang）定理，针对新的射频链路共享架构推导出配置包括低精度在内的有限量化精度数模/模数转化单元的系统可达传输速率性能，给出毫米波大规模 **MIMO** 信道下的系统性能与电路射频链路数目、模拟预编码网络中移相器配置数、数模/模数量化单元精度等系统参数之间的显式关系，从而指导应用系统中硬件配置。
- 4) 面向大带宽高频段通信组网，针对公共信道提出具有良好小区边缘覆盖能力的信息广播技术，为低时延的用户接入提供保障，进一步面向通信组网提出移动环境下高频段通信协作组网的方法，为移动终端建立稳定可靠的毫米波宽带通信链路。
- 5) 搭建支持大规模天线阵列的宽带毫米波通信异构网络系统级仿真平台。引入毫米波宽带 **MIMO** 信道仿真模型，通过硬件辅助方式实现高速的大规模密集分布的异构网络系统级仿真，实现对移动环境下毫米波协作网络覆盖的小区平均频谱效率，小区边缘频谱效率，用户终端概率等主要指标进行评估和分析。



## 5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

### 5.1 年度研究计划

| 年度   | 研究计划  | 研究成果体现   |
|------|---|--|
| 第一年度 | <ol style="list-style-type: none"><li>1. 调研和分析高频段信道建模方法和测量数据，研究适合大规模阵列高频段通信仿真和性能分析的信道模型；</li><li>2. 初步研究欠自由度信道下信道容量的分析方法。</li></ol>                                       | <ul style="list-style-type: none"><li>◆ 申请专利 1~2 项；</li><li>◆ 研究结果撰写并投稿 IEEE Transactions 等期刊 1~2 篇和 IEEE 国际会议论文 1~2 篇。</li></ul>  |
| 第二年度 | <ol style="list-style-type: none"><li>1. 实现对欠自由度毫米波信道容量和传输速率界的分析；</li><li>2. 研究射频链路共享和低精度 ADC/DAC 下的毫米波 MIMO 信道估计方法，分析系统性能；</li><li>3. 研究信道估计下的混合预编码与量化预编码优化算法。</li></ol> | <ul style="list-style-type: none"><li>◆ 申请专利 2 项；</li><li>◆ 研究结果撰写并投稿 IEEE Transactions 等期刊 2~3 篇和 IEEE 国际会议论文 2 篇。</li><li>◆ 参加国际学术会议 1~2 次</li><li>◆ 邀请国内外相关领域专家学术讲座 1 次。</li></ul>  |
| 第三年度 | <ol style="list-style-type: none"><li>1. 进一步优化新电路构架的设计，研究对应架构下混合与量化预编码的优化算法；</li><li>2. 研究高频段通信的公共信道广播和低时延用户接入技术；</li><li>3. 研究毫米波协作通信覆盖技术。</li></ol>                     | <ul style="list-style-type: none"><li>◆ 申请专利 2 项；</li><li>◆ 研究结果撰写并投稿 IEEE Transactions 等期刊 2~3 篇和 IEEE 国际会议论文 2 篇；</li><li>◆ 参加国际学术会议 1~2 次；</li><li>◆ 邀请国内外相关领域专家学术讲座 1 次。</li></ul> |
| 第四年度 | <ol style="list-style-type: none"><li>1. 在之前工作基础上，继续重点高频段覆盖传输技术的鲁棒性设计方案；</li><li>2. 完善对毫米波异构网络协作覆盖的技术研究；</li><li>3. 搭建系统级仿真平台，对关键算法进行验证。</li></ol>                        | <ul style="list-style-type: none"><li>◆ 完成系统级仿真平台搭建；</li><li>◆ 申请专利 2 项；</li><li>◆ 研究结果撰写并投稿 IEEE Transactions 等期刊 2~3 篇和 IEEE 国际会议论文 2 篇；</li><li>◆ 参加国际学术会议 1 次。</li></ul>           |





## 5.2 预期研究结果总结

本项目为基础应用研究，项目成果形式主要为学术论文成果和系统级仿真验证平台等，按上述计划说明，项目的预期研究成果将包括：

- (1) 在国内外核心期刊和会议上发表学术论文 16 篇（SCI/EI 检索），其中在 IEEE 学会会刊（如 IEEE Transactions/Journals/Letters）等国际知名期刊上发表论文不少于 10 篇。
- (2) 搭建并完善面向毫米波通信异构协作覆盖网络的系统级仿真平台，支持大规模阵列和多层网络协作覆盖的配置，对于关键模块采用硬件辅助加速的方法实现高速并行仿真，用于评估网络整体性能指标。
- (3) 相关研究成果申请国家发明专利 8 项。
- (4) 积极开展国际交流，组织课题组成员参加国际学术会议包括 IEEE Globecom, IEEE ICC, IEEE WCNC 等不低于 3 次，邀请相关领域国际专家访问交流。
- (5) 培养博士研究生和硕士研究生 6 名及以上。





## (二) 研究基础与工作条件

### 1. 研究基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）；

项目申请人长期从事移动通信相关理论和应用技术的科研工作，对信息论和信号处理技术在移动通信中的应用有较深入的理解，团队具有扎实的理论基础和研究能力。项目申请人和团队主要成员先后主持或承担了国家自然科学基金、国家 973 项目课题、国家重大科技专项以及校企合作项目等课题研究，在多天线和协作通信领域取得了扎实的技术积累，研究成果在 **IEEE 通信以及信号处理等相关领域会刊（Transactions、Journal）/快报（Letters）** 上已经发表学术论文 **60** 余篇。申请人在协作通信领域的研究成果获得 **2014 年江苏省自然科学奖一等奖**。近几年，申请人团队在大规模多天线领域的研究成果获得了多项国际论文奖项，其中包括 **2014 年 IEEE Globecom 最佳论文奖**，**2014 年 IEEE/CIC ICC** 最佳论文奖，**2016 IEEE ICWUB 最佳论文奖**，以及两篇学术论文入选 **ESI 高引论文**等。在前期研究过程中，申请人团队与国际相关领域的多位知名学者形成了良好的合作关系，其中包括佐治亚理工的 **Geoffery Ye Li** 教授，加州大学戴维斯分校的 **Zhi Ding** 教授，南安普敦大学的 **Lajos Hanzo** 教授，加州大学尔湾分校的 **A. Lee Swindlehurst** 教授，加拿大维多利亚大学的 **Xiaodai Dong** 教授，加拿大大不列颠哥伦比亚大学的 **Vijay Bhargava** 教授等。与包括这些教授在内的该领域国内外知名学者之间的良好和长期合作也为本项目研究内容的开展积累了丰富的经验，奠定了良好的国际合作研究环境和基础。

申请人团队近年来在 **IEEE Transactions** 等多个国际知名期刊上已经发表了与大规模多天线通信相关研究论文数十篇，这些研究成果也为本项目研究在高频段通信上的开展打下了坚实基础。团队近年来取得的相关研究成果中代表性研究工作基础包括：

- 团队与 2014 年底在 **IEEE Wireless Communications Letter** 上发表了一篇关于现有频段信道中大规模 **MIMO** 混合数字与模拟多用户预编码的论文，题目为“**Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems**”。该工作是国内外相关研究方向的早期工作之一，目前已经被引用超过 **160** 次，刊出后多次入选该 **IEEE** 期刊的月度 **Top Popular Documents**（最受欢迎论文）前三位。随着 **5G** 及其演进网络部署和研究工作的进一步推进，适应于毫米波信道的相关研究成为亟待解决的热点问题之一。
- 面向未来的移动通信网络，高频段的毫米波终端天线的设计一直是一个重要但较少被涉及的领域。申请人团队于 2017 年 8 月在 **IEEE Access** 期刊上发表了一篇题为“**5G cellular user equipment: From theory to practical hardware design**”的论文，介绍了我们最新提出的 **5G** 终端毫米波天线阵列设计方案。根据 **IEEE** 期刊主页统计，该论文单月下载量最高突破 **6000** 次，曾入选 **2017**



年 9 月 IEEE 所有期刊论文中的月度最受欢迎论文第 10 位 (Most Popular Documents)。

- 团队近期开始针对射频链路共享电路下的一些基础理论问题进行研究。在当前公网频段假设下,我们最近的成果从理论上分析了独立不相关的瑞丽衰落信道下系统电路设计的最佳射频链路阵列天线数目之间的关系,给出了系统的能效性能。该成果已经发表在 2017 年第 9 期的 IEEE Transactions on Communications 上(论文题目:“Spectral and energy efficiency of multi-pair massive MIMO relay network with hybrid processing”),多次入选该期刊的月度 Top Popular Documents。如前所述,高频段毫米波信道由于具有多域稀疏性等特征,之前结论的假设条件不再成立,欠自由度信道也带来了大规模阵列信道场景下性能分析的新困难,因此在新场景下的这一基础问题目前还没有明确的理论结论,需要突破现有方法展开针对性研究。
- 申请人团队近期针对未来密集网络中的高效协作接入问题也已经开始展开研究。面向未来异构密集网络,我们最近提出一种基于提升用户公平效用和满意度的高效多用户接入算法,并引入机器学习理论形成了新的低时延接入策略。该研究内容中的初步研究成果已经撰写并投稿国际期刊 IEEE Wireless Communications Letters,目前处于第一轮审稿修改中。两位匿名审稿人均给出了总体积极的评价,分别为“Overall, the proposed algorithm is quite novel, and the letter is clearly organized and well presented.”和“In general, the presentation and technical of this paper is good.”。

此外,申请人团队目前已经完成了一套面向 LTE-A 网络的系统级仿真平台搭建。图 16 中给出了课题组系统级仿真平台的界面功能。该系统级仿真平台目前已经可以支持 19 小区(加上 Wrap-round 技术为 57 小区)的网络拓扑结构下的传统非协作传输,同构网络协作传输系统级仿真。该平台是根据 3GPP 标准的系统级仿真平台要求搭建,支持 ITU 规定的等多种信道模型(如 UMa, UMi, RMa 等)。目前,本系统级仿真平台已经通过了 3GPP 规定的三步校准,图 17 给出了课题组开发的系统级仿真平台部分校准结果与 3GPP 各家厂商给出校准结果的比较。从图中可以看出课题组开发的系统级仿真平台的校准结果与目前国内外知名通信企业的系统级仿真平台校准结果吻合很好。

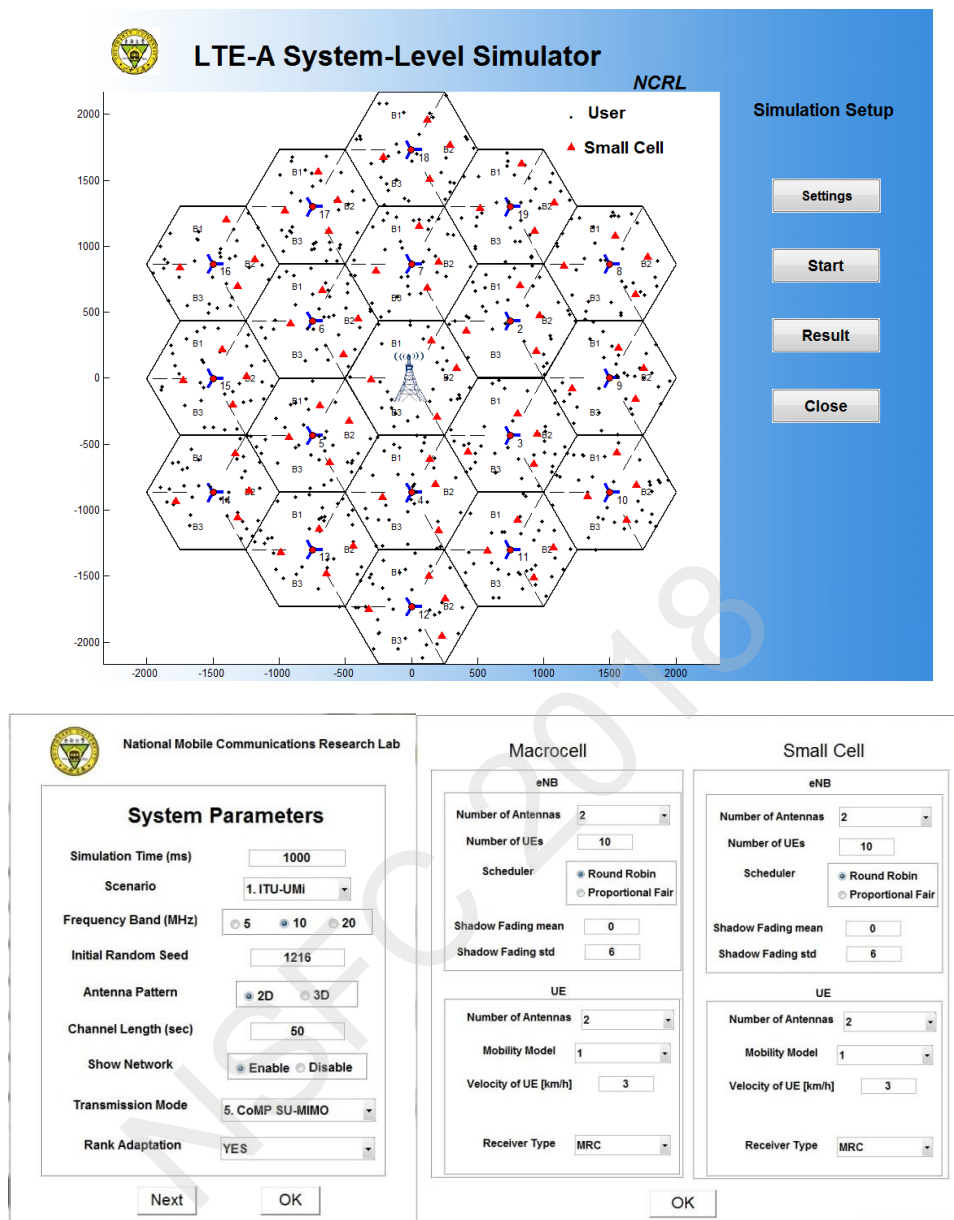
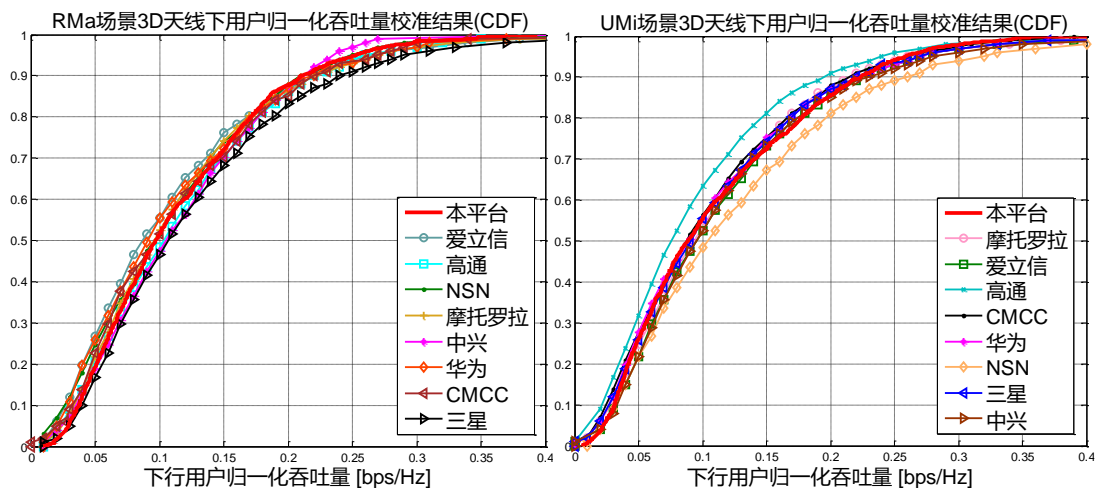


图 16. 申请人团队搭建的系统级仿真平台功能界面





## 2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；

本课题申请的主要依托为东南大学移动通信国家重点实验室。实验室是1990年经国家教委和国家计委批准，利用世界银行贷款及国内配套资金，在东南大学建立国内高校中唯一专门从事移动通信研究的国家重点实验室。移动通信国家重点实验室所依托的东南大学“通信与信息系统”二级学科在“九五”期间享受211工程重点资助，1998年获“信息与通信工程”一级学科博士学位授予权，现有教师55人，其中教授27人，副教授20人，其中教育部长江学者5名、国家中组部千人计划3名、国家杰出青年基金获得者3名。目前博士后9人，在校博士生95人、硕士生305人。

实验室有宽带无线传输理论与多址技术、现代信号处理及其在移动通信中应用、移动通信网络与系统理论及应用、近距离无线通信等四个主要研究方向。实验室曾牵头承担并完成了国家863计划重大项目“新一代蜂窝移动通信系统无线传输链路技术研究”、“Beyond 3G 蜂窝移动通信无线网络试验系统研究开发”、以及“Beyond 3G 移动通信研究开发总体项目”，牵头承担了国家自然科学基金重大项目“未来移动通信系统基础理论与技术研究”，并承担了多项国际合作项目，实验室与国内7所优势高校和国内外多家大型企业与研究机构合作，探索并形成较为完整的第四代移动通信技术体系，在若干关键理论和技术方面取得突破，获取了一系列核心技术专利，构建了传输速率达100兆比特/秒的第四代蜂窝移动通信试验系统，向国际标准化组织提交了一批技术提案。

实验室在长期的科研与教学过程中形成了一支理论扎实、工程经验丰富、攻坚能力强、高度稳定的科研队伍。另外，实验室建立有完备的无线通信系统仿真和硬件测试平台。经过多年建设拥有近4000平方米的工作场所，先进的测试仪器、工作站两百余台、高档微机近500台，并配备了价值几千万元的国际先进的电子设计自动化（EDA）软件。拥有的主要仪器和设备包括：MIMO信道仿真仪、矢量信号源、频谱分析仪、信号分析仪、宽带示波器、噪声分析仪、网络分析仪、数据采集系统等国际先进的测试、分析仪器以及服务器，能够对各种无线移动通信系统的物理链路和无线组网性能进行详尽的测试与分析。这些环境为本课题组完成本项目提供了理想平台。

## 3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况（申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的名称和编





## 号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等);

申请人正负责主持国家自然科学基金面上基金项目一项,项目名称为“大规模天线环境下协作复用传输与干扰控制技术”,项目编号为“61471114”,起止年月:2015.01-2018.12。课题组已经完成项目的各项预期研究任务,将于2018年12月按时结题。该项目主要是针对大规模MIMO系统下的多用户复用传输与干扰抑制进行研究,主要考虑了在有限大规模天线阵列场景下的大规模MIMO多用户传输性能分析,针对经典多用户MIMO场景,中继协作大规模MIMO通信系统、大规模MIMO高能效通信等方向进行了大规模阵列发送优化设计,分析了非理想信道信息对该多天线系统的性能影响。其中针对多用户复用传输和非理想信道信息影响的研究结论和方法可以对高频段通信信道场景下的大规模MIMO传输技术部分的内容研究提供理论和方法基础。

## 4. 完成国家自然科学基金项目情况(对申请人负责的前一个已结题科学基金项目(项目名称及批准号)完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要(限500字)和相关成果的详细目录)。

申请人已完成结题的国家自然科学基金青年基金项目一项,项目名称为“闭环多天线系统中多用户传输理论与技术研究”,项目编号“61101087”,项目起止年月:2012.01-2014.12。课题组已经完成项目的各项预期研究任务,并于2014年12月按时结题。该项目主要是针对传统多天线系统中的多用户传输进行研究,考虑闭环信道信息反馈情况下的多用户发送预编码和调度技术,研究了非理想信道信息对该多天线系统的性能影响。其中,针对多天线传输理论方面的研究方法和研究成果可以对本申请项目中高频段大规模多天线传输理论的研究提供基础和借鉴。本课题中针对高频段大规模天线传输的研究在一定程度上是对此前课题中传统多天线传输系统研究方法和内容的演进和发展,其中针对多用户复用传输以及非理想信道状态信息影响的研究成果为当前申请项目的相关研究内容奠定了坚实的基础。项目组将在此前研究的基础上,针对高频段通信下的信道稀疏性与大规模天线阵列特征进行重点研究,分析比较前期经典多用户多天线系统下的结论变化,进一步探索新技术特征下面向硬件资源受限设计的传输优化方法。该结题项目的研究工作总结和相关成果目录详见附件。



### （三）其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系。

申请人 2018 年同时申请了国家自然科学基金优秀青年基金一项，项目名称为“智能通信信号处理”，其主要围绕未来通信网络中智能化的通信信号处理及网络资源优化管理。该项目拟分别针对物理资源受限下大规模 MIMO 链路的智能传输技术，以及未来多频段异构协作网络构架下的智能资源管理的理论方法展开研究，从而解决未来无线通信网络中所面临的大规模宽带数据实时信号处理、系统非线性耦合特征凸显、终端需求多样复杂等诸多挑战性问题。

申请人今年拟报的优秀青年基金项目研究内容与本项目拟定的研究内容都是针对解决未来移动通信网络中面临的高带宽、低时延、高可靠等海量新型智能数据终端业务新需求等挑战性问题。优秀青年基金侧重于未来网络中物理层传输与网络资源分配的智能化设计与优化方法研究，主要是探索包括深度学习和增强学习等现代人工智能方法在未来无线网络智能化管理中的应用潜力和理论方法。而本面上基金项目研究则组要侧重于高频段信道条件下的通信链路理论性能分析，解决大规模阵列等环境中硬件和功率资源受限下的多天线发送优化与接收设计，优化高频段通信网络对广域移动终端覆盖的鲁棒性。所采用的研究技术方法偏重于采用信息论、随机矩阵理论、凸优化理论等通信理论方法研究中的基础数据理论与工具。因此，本申请项目的研究系统模型与今年同时申请的优秀青年基金拟研究系统模型有一定的相关性，研究技术方法和主要数学手段有所区别，需要解决的主要问题也各有侧重。

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如





存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无

4. 其他。

无

NSFC 2018



## 许威 简历

东南大学，04信息学院，教授

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

- (1) 2005.3 - 2009.5, 东南大学, 通信与信息系统, 博士, 导师: 赵春明/丁峙
- (2) 2003.9 - 2005.2, 东南大学, 通信与信息系统, 硕士, 导师: 陈晓曙
- (3) 1999.9 - 2003.6, 东南大学, 电气工程及其自动化, 学士, 导师: 尤鋈

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

- (1) 2017.9-至今, 加拿大维多利亚大学, 电子与计算工程系, 兼职教授 (Adjunct Professor)
- (2) 2016.5-至今, 东南大学, 信息科学与工程学院, 教授
- (3) 2010.6-2016.4, 东南大学, 信息科学与工程学院, 副教授
- (4) 2009.6-2010.5, 加拿大维多利亚大学, 博士后, 合作导师: Xiaodai Dong

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）：

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况：

1. 江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助计划, GDZB-005, 超高频段通信装备传输理论与技术研究, 2016/09-2019/09, 4万元, 在研, 主持。
2. 国家自然科学基金面上项目, 61471114, 大规模天线环境下协作复用传输与干扰控制技术, 2015/01-2018/12, 83万元, 在研, 主持。
3. 国家科技重大专项, 2014ZX03003002, 同频同时全双工组网技术研发, 2014/01-2015/12, 138万元, 结题, 参加。
4. 西安电子科技大学ISN国家重点实验室开放课题, ISN14-11, 协作通信系统中多用户传输和干扰控制技术, 2013/06-2015/05, 5万, 结题, 主持。
5. 国家973计划, 2013CB329204, 宽光谱通信多维资源联合优化研究, 2013/01-2017/07, 583万, 结题, 参加。
6. 国家自然科学基金, 61271018, 未来B4G/5G 网络中基于协同MIMO 传输的干扰管理研究, 2013/01-2016/12, 80万元, 结题, 参加。
7. 国家自然科学基金青年基金, 61101087, 闭环多天线系统中多用户传输理论与技术研究, 2012/01-2014/12, 30万元, 结题, 主持。



8. 教育部博士点基金, 20110092120011, 面向LTE-Advanced 的多点协作传输理论与技术研究, 2012/01-2014/12, 4万元, 结题, 主持。

9. 北京交通大学轨道交通安全与控制国家重点实验室开放课题, RCS2011K003, 基于增强多天线的高速铁路宽带通信技术研究, 2012/01-2013/12, 5万元, 结题, 主持。

### 代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“\*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：①10篇以内代表性论著；②论著之外的代表性研究成果和学术奖励。

#### 一、10篇以内代表性论著

(1) **Wei Xu<sup>(\*)</sup>** ; Jian Liu; Shi Jin; Xiaodai Dong, Spectral and energy efficiency of multi-pair massive MIMO relay network with hybrid processing, IEE E Transactions on Communications, 2017.9.1, 65(9): 3794~3809 (期刊论文)

(2) **Wei Xu<sup>(\*)</sup>** ; Yuke Cui; Hua Zhang; Geoffrey Ye Li; Xiaohu You, Robust beamforming with partial channel state information for energy efficient networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015.12.1, 33(12): 2920~2935 (期刊论文)

(3) **Wei Xu<sup>(\*)</sup>** ; Xian Wu; Xiaodai Dong; Hua Zhang; Xiaohu You, Dual-polarized massive MIMO systems under multi-cell pilot contamination, IEEE Access, 2016.10.1, 4: 5998~6013 (期刊论文)

(4) **Wei Xu<sup>(\*)</sup>** ; Zhangjie Peng; Shi Jin, On secrecy of a multi-antenna system with eavesdropper in close proximity, IEEE Signal Processing Letters, 2015.10.1, 22(10): 1525~1529 (期刊论文)

(5) **Wei Xu<sup>(\*)</sup>** ; Man Wu; Hua Zhang; Xiaohu You; Chunming Zhao, ACO-OFDM specified recoverable upper clipping with efficient detection for optical wireless communications, IEEE Photonics Journal, 2014.10.1, 6(5) (期刊论文)



(6) Zhangjie Peng; **Wei Xu**<sup>(\*)</sup>; Li-Chun Wang; Chunming Zhao, [Achievable rate analysis and feedback design for multiuser MIMO relay with imperfect CSI](#), IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014.02.01, 13(2): 780~793 (期刊论文)

(7) **Wei Xu**<sup>(\*)</sup>; Xiaodai Dong, [Optimized one-way relaying strategy with outdated CSI quantization for spatial multiplexing](#), IEEE Transactions on Signal Processing, 2012.8.01, 60(8): 4458~4464 (期刊论文)

(8) **Wei Xu**; Xiaodai Dong; Wu-Sheng Lu, [Joint precoding optimization for multiuser multiantenna relaying downlinks using quadratic programming](#), IEEE Transactions on Communications, 2011.01.01, 59(5): 1228~1235 (期刊论文)

(9) **Wei Xu**<sup>(\*)</sup>; Xiaodai Dong; Wu-Sheng Lu, [MIMO relaying broadcast channels with linear precoding and quantized channel state information feedback](#), IEEE Transactions on Signal Processing, 2010.01.1, 58(10): 5233~5245 (期刊论文)

(10) **Wei Xu**<sup>(\*)</sup>; Chunming Zhao; Zhi Ding, [Limited feedback design for MIMO broadcast channels with ARQ mechanism](#), IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009.01.01, 8(4): 2132~2141 (期刊论文)

## 二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励

(1) **许威**(6/11), 分布式组网与协作传输理论及应用, 江苏省人民政府, 科学技术奖, 省部一等奖, 2015.01.06  
(尤肖虎; 高西奇; 金石; 王东明; 陈明; **许威**; 江彬; 李潇; 潘志文; 赵春明; 赵新胜)  
(科研奖励)

(2) **Wei Xu**<sup>(\*)</sup> (1/4), Dynamic cell clustering for CoMP in LTE-A and its calibrated system level performance evaluation, IEEE Antenna and Propagation Society, IEEE MAPE Conference Committee, IEEE MAPE Best Paper Award in 2013, 国际学术奖, 2013.10.31

(**Wei Xu**<sup>(\*)</sup>; Jian Huang; Fei Yang; Hua Zhang) (科研奖励)

(3) **Wei Xu**<sup>(\*)</sup> (3/4), Semi-orthogonal Pilot Design for Massive MIMO Systems Using Successive Interference Cancellation, IEEE Communications Society, IEEE Globecom Best Paper Award in 2014, 国际学术奖, 2014.12.6

(Xinru Zheng; Hua Zhang; **Wei Xu**<sup>(\*)</sup>; Xiaohu You) (科研奖励)

(4) **Wei Xu**(3/4), How to approach zero-forcing under RF chain limitations in large mmWave multiuser systems?, IEEE Communications Society, China Institute



of Communications, IEEE/CIC ICC Best Paper Award in 2014, 国际学术奖, 2014.10.14

(Le Liang; Yongyu Dai; **Wei Xu**; Xiaodai Dong) (科研奖励)

(5) **Wei Xu**; Jia Wang; Hua Zhang, A multi-receiving-point geometrical center locating system and method for visible light communication, 2017.11.2, 美国, US 2017/0317746 A1 (专利)

(6) Hua Zhang; Xinru Zheng; **Wei Xu**, Pilot allocation method based on coherence time for large-scale MIMO systems, 2017.2.14, 美国, US 2017/0264410 A1 (专利)

(7) Chaofeng Li; Ming Lei; **Wei Xu**; Le Liang; Hua Zhang; Shi Jin, Method and apparatus for interference control, 2012.6.7, 美国, US 9479312 B2 (专利)

(8) Haochuan Zhang; Yang Hu; **Wei Xu**; Hong Shen, User equipment, radio base station and respective methods therein for joint transmitting and receiving procedure, 2012.2.3, 美国, US 9706548 B2 (专利)

(9) **许威**; 刘健; 张华, 双工通信传输模式选择方法、装置及双工通信方法、系统, 2017.11.14, 中国, ZL201510219491.3 (专利)

(10) **许威**; 彭张节; 赵春明, 多天线安全通信系统中基于信道估计的有限反馈传输方法, 2017.9.29, 中国, ZL201410830926.3 (专利)

(11) 史锋峰; **许威**; 沈弘, 一种蜂窝移动通信D2D系统中自适应协作传输方法, 2017.6.9, 中国, ZL201410226784X (专利)

(12) **许威**; 吴满, 一种采用乘性削波的可见光多载波传输方法, 2017.5.10, 中国, ZL201510134897.1 (专利)

(13) **许威**; 黄健; 张华, 基于并行结构的协作网络系统级仿真方法, 2017.1.11, 中国, ZL201310671899.5 (专利)

(14) **许威**; 赵晶晶, LTE-A终端反馈系统中双码本差分设计方法, 2016.11.23, 中国, ZL201410003558.5 (专利)

(15) **许威**; 吴宪, 面向大规模天线阵列的无线能量信息传输网络功控方法, 2016.9.7, 中国, ZL201510028654.X (专利)

(16) **许威**; 王宇成; 张华, 一种采用数模混合检测的大规模天线阵列中继传输方法, 2016.9.14, 中国, 201618021082.8 (专利)

(17) **许威**; 崔宇柯, 一种高能效的异构小区接入方法, 2015.11.10, 中国, 201510760867.1 (专利)

(18) **许威**; 徐锦丹; 张华, 一种采用乘性削波的可见光多载波传输方法, 2015.3.26, 中国, 201510134897.1 (专利)



(19) 许威; 朱道华; 赵春明, 码分多径信道的序贯多天线选择发送方法, 2014. 1. 8, 中国, ZL201110167378. 7 (专利)

(20) 许威; 李强, 通信资源分配方法、系统、终端及网络侧设备, 2013. 6. 7, 中国, 201310225972. 6 (专利)

NSFC 2018





除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

## 参与者 简历

Xiaodai Dong（董晓岱），加拿大维多利亚大学，电子与计算机工程系，教授

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

1996/08-2000/06，加拿大女王大学，电子与计算机工程，博士，

导师：Norman C. Beaulieu and Paul Wittke

1994/09-1995/06，新加坡国立大学，电子工程，硕士，

导师：Tjeng Thiang Tjhung

1988/08-1992/06，西安交通大学，信息与控制工程，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

1. 2013/07-至今，加拿大维多利亚大学，电子与计算机工程系，教授
2. 2007/07-2013/06，加拿大维多利亚大学，电子与计算机工程系，副教授
3. 2005/01-2007/06，加拿大维多利亚大学，电子与计算机工程系，助理教授
4. 2002/02-2004/12，加拿大阿尔伯塔大学，电子与计算机工程系，助理教授
5. 1999/10-2002/01，北电网络（Nortel Networks），系统工程师

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：

1. Fortinet Technologies contract（企业研究计划），A Highly Automated Indoor Location and Map Generation, , 2017/01-2018/12, \$100,000, 在研，负责
2. 加拿大自然科学与工程研究基金，No. 261524, Wireless Machine-to-Machine Communication Networks, 2012/03-2019/12, \$210,000, 在研，负责



3. 加拿大研究主席计划, Ultra-Wideband Communications, 2005/03/01-2010/03/01, \$500,000, 已结题, 负责
4. 大不列颠哥伦比亚创新基金, Ultra-wideband Systems for Wireless Sensor Networks with Applications to Natural Resources and Health Care Sectors, 2010/05-2014/12, \$300,000, 已结题, 负责

### 代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“\*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：①10篇以内代表性论著；②论著之外的代表性研究成果和学术奖励。

#### ① 10篇以内代表性论著

- (1) Weiheng Ni, **Xiaodai Dong\***, Wu-Sheng Lu, Near-optimal hybrid processing for massive MIMO systems via matrix decomposition, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(15), 3922~3933
- (2) Yongyu Dai, **Xiaodai Dong\***, Power allocation for multi-pair massive MIMO two-way AF relaying with linear processing, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(9): 5932~5946
- (3) Zheng Xu, **Xiaodai Dong\***, Jens Bornemann, Design of a reconfigurable MIMO system for THz communications based on graphene antennas, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(5), 609~617
- (4) Wei Xu\*, **Xiaodai Dong**, Wu-Sheng Lu, Joint precoding optimization for multiuser multi-antenna relaying downlinks using quadratic programming, *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(5): 1228~1235
- (5) **Xiaodai Dong\***, Li Jin, Philip Orlik, A new transmitted reference pulse cluster system for UWB communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(5), 3217~3224
- (6) **Xiaodai Dong\***, Wu-Sheng Lu, Anthony CK Soong, Linear interpolation in pilot symbol assisted channel estimation for OFDM, *IEEE Transactions on Wireless*



*Communications*, 2007, 6(5): 1910~1920

- (7) **Xiaodai Dong\***, Norman C Beaulieu, A new method for calculating symbol error probabilities of two-dimensional signalings in Rayleigh fading with channel estimation errors, *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 54(2): 538~549
- (8) **Xiaodai Dong\***, Norman C Beaulieu, New analytical probability of error expressions for classes of orthogonal signals in Rayleigh fading, *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(6): 849~853
- (9) **Xiaodai Dong\***, Norman C Beaulieu, Paul H Wittke, Error probabilities of two-dimensional M-ary signaling in fading, *IEEE Transactions on Communications*, 1999, 47(3): 352~355
- (10) **Xiaodai Dong\***, Norman C Beaulieu, Paul H Wittke, Signaling constellations for fading channels, *IEEE Transactions on Communications*, 1999, 47(5): 703~714

## ② 论著之外的代表性研究成果和学术奖励

### 一、授权发明专利

- (1) **Xiaodai Dong**, Transmission and detection in ultrawide band communications, 2006.04.06, 美国发明专利, US20070025420A1

### 二、获得学术奖励

- (1) Le Liang, Yongyu Dai, Wei Xu, **Xiaodai Dong**, How to approach zero-forcing under RF chain limitations in large mmWave multiuser systems?, 2014 ICC Best Paper Award (国际会议最佳论文奖)
- (2) **Xiaodai Dong**, Ultra-wideband Communications, Canada Research Chair (Tier II), 2010. (入选加拿大研究主席计划)



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

## 参与者 简历

姜明，东南大学，信息科学与工程学院，副教授

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

2003/03-2007/01，东南大学，通信与信息系统，博士，导师：赵春明

2001/09-2003/06，东南大学，通信与信息系统，硕士，导师：王玲

1994/08-1998/06，东南大学，通信与信息系统，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

1. 2007/01-至今，东南大学，通信与信息系统，副教授

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：

1. 国家自然科学基金青年项目，61601115，蜂窝网络中D2D通信的干扰控制技术，2017/01-2019/12，22万，在研，参与
2. 国家自然科学基金-国际(地区)合作与交流项目，61461136003，5G无线传输关键技术研究，2015/01-2018/12，200万，在研，参与
3. 国家重点基础研究发展计划（973），2013CB329204，宽光谱通信多维资源联合优化研究，2013/01-2017/12，126.67万，已结题，参与
4. 国家科技重大专项，2009ZX03002-003，TD-LTE终端基带算法，2009/3-2010/12，306万，已结题，参与
5. 国家自然科学基金青年项目，60802007，随机网络编码中的纠错技术研究，2009/01-2011/12，18万，已结题，主持

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止



页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“\*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：①10篇以内代表性论著；②论著之外的代表性研究成果和学术奖励。

### ① 10篇以内代表性论著

- (1) **Ming Jiang\***, Jun Zhang, Xiao Liang, Chunming Zhao, Direct current bias optimization of the LDPC coded DCO-OFDM systems, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(19): 2095~2098
- (2) Haitao Yang, **Ming Jiang\***, Hong Shen, Chunming Zhao, A distributed LT code design for multiple-access relay networks subject to erasures, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 19(4): 509~512
- (3) Huang Zhou, **Ming Jiang\***, Chunming Zhao, Optimization of protograph-based LDPC coded BICM-ID for the poisson PPM channel, *IEEE Communications Letters*, 2013, 12(1): 2344~2347
- (4) **Ming Jiang\***, Chunming Zhao, Enyang Xu, Li Zhang, Reliability-based iterative decoding of LDPC codes using likelihood accumulation, *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(8): 677~679
- (5) **Ming Jiang\***, Chunming Zhao, Li Zhang, Enyang Xu, Adaptive offset min-sum algorithm for low-density parity check codes, *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(6): 483~485
- (6) **Ming Jiang\***, Chunming Zhao, Zhihua Shi, An improvement on the modified weighted bit flipping decoding algorithm for LDPC codes, *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(9): 814~816

### ② 论著之外的代表性研究成果和学术奖励

#### 一、授权发明专利

- (1) 姜明、邱朗、梁霄、黄鹤，一种适用于可见光通信的空间调制发射方法，2016.8.31，中国发明专利，ZL201410469894.9
- (2) 姜明、朱琳，一种用于LTE下行控制信道的盲检系统及其盲检测方法，2017.02.01，中国发明专利，ZL201310438063.0



- (3) 姜明、张华，一种适用于无线双向中继系统预旋转相位的信号发送方法，2014.08.06，中国发明专利，ZL201110440677.3
- (4) 姜明、赵欢、张华，一种长期演进系统用混合自动重传请求的网络编码方法，2013.11.27，中国发明专利，ZL201110308124.2
- (5) 姜明、赵春明、赵欢、张华、黄鹤，一种长期演进系统的拓扑码传输块译码迭代的动态分配方法，2013.05.01，中国发明专利，ZL201110110177.3

NSFC 2018





## 附件信息

| 序号 | 附件名称                       | 备注 | 附件类型  |
|----|----------------------------|----|-------|
| 1  | 五篇代表作-代表论著[1]              |    | 代表性论著 |
| 2  | 五篇代表作-代表论著[2]              |    | 代表性论著 |
| 3  | 五篇代表作-代表论著[6]              |    | 代表性论著 |
| 4  | 五篇代表作-代表论著[7]              |    | 代表性论著 |
| 5  | 五篇代表作-代表论著[8]              |    | 代表性论著 |
| 6  | 海外合作人员Xiaodai Dong教授的签字授权书 |    | 其他    |
| 7  | 江苏省科学技术奖一等奖                |    | 科技奖励  |
| 8  | IEEE MAPE 2013 最佳论文奖       |    | 科技奖励  |
| 9  | IEEE Globecom 2014 最佳论文奖   |    | 科技奖励  |
| 10 | IEEE/CIC ICC 2014 最佳论文奖    |    | 科技奖励  |
| 11 | 授权和已受理专利申请公告书              |    | 专利    |
| 12 | 已结题的青年基金工作总结与成果目录          |    | 其他    |

**签字和盖章页(此页自动生成, 打印后签字盖章)**

接收编号: 6187010770

申请人: 许威

依托单位: 东南大学

项目名称: 高频段通信阵列传输与广域覆盖理论方法

资助类别: 面上项目

亚类说明:

附注说明:

**申请人承诺:**

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助, 我将履行项目负责人职责, 严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 认真开展工作, 按时报送有关材料。若填报失实和违反规定, 本人将承担全部责任。

签字:

**项目组主要成员承诺:**

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助, 我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 加强合作、信息资源共享, 认真开展工作, 及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定, 本人将承担相关责任。

| 编号 | 姓名           | 工作单位名称<br>(应与加盖公章一致) | 证件号码               | 每年工作<br>时间(月) | 签字 |
|----|--------------|----------------------|--------------------|---------------|----|
| 1  | Xiaodai Dong | 加拿大维多利亚大学            | HC341200           | 4             |    |
| 2  | 姜明           | 东南大学                 | 320113197605172416 | 6             |    |
| 3  | 徐锦丹          | 东南大学                 | 320581199210254422 | 10            |    |
| 4  | 杜劲波          | 东南大学                 | 320106199107082819 | 10            |    |
| 5  | 董培浩          | 东南大学                 | 370883199010270952 | 10            |    |
| 6  | 赵雅琼          | 东南大学                 | 610302199506041525 | 10            |    |
| 7  | 王宇成          | 东南大学                 | 320281199402236513 | 10            |    |
| 8  | 黄谢田          | 东南大学                 | 420982199402246744 | 10            |    |
| 9  | 周少卿          | 东南大学                 | 320324199605198623 | 10            |    |

**依托单位及合作研究单位承诺:**

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助, 我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障, 严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定, 督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章

日期:

合作研究单位公章1

日期:

合作研究单位公章2

日期: