

## 6G 移动通信关键技术与发展前景综述

姓名：胡成成      学号：41724260

北京科技大学计通学院通信 1701 班

---

**摘要：**随着 5G 的商用，6G 的研究各国和各组织也逐个启动。本文针对 6G 展开调研分析并加以总结，首先分析 5G 到 6G 过渡或发生的变化。其次分析 6G 技术的特点：覆盖性，开放性，安全性和自生性，对应网络信息技术的融合、智能、开放、泛在特性，将成为未来的发展方向。紧接着对全球 6G 研究进展进行概括总结并对 6G 的关键技术：太赫兹通信技术，对太赫兹技术简要概述，给出潜在的辐射危害和相关工作介绍；空间复用技术，对该技术简要概述，介绍 MIMO 相关概念并对相关工作归纳；“空天地”一体化通信，从网络结构设计及相关应用场景下的针对性的设计进行归纳；超密集蜂窝网络，对异构蜂窝网络的相关进展概述。随后对其它可能潜在 6G 技术进行列举。最后对 6G 愿景和技术进行展望。本文的主要贡献如下：（1）总结最新 6G 中文文献的相关工作；（2）对 6G 未来的前景和技术进行展望，可能有一些参考价值。

**关键字：**第六代移动通信；太赫兹；空间复用技术；空天地一体化通信；超密集蜂窝网络

---

## 1. 引言

### 1.1 从 5G 的角度看 6G

第六代移动通信系统<sup>[1]</sup>（The Sixth generation Mobile Communication System, 6G）的总体发展目标和愿景，将网络主体从第五代移动通信系统（The Fifth Generation Mobile Communication System, 5G）网络的“人—网—物”拓展至“人—网—物—境”4 个维度，呈现出“无人不互联”、“无时不互联”、“无处不互联”和“无事不互联”的 4 个新形态发展趋势。与 5G 网络主要面向人和物联网之间的通信不同，6G 时代的移动通信将不再仅仅关注网络传输性能，而是更加侧重于满足人类个性化需求，回归到人们所关注的生活、环境和精神层面等各方面要求，达到“6G 改变环境”的愿景。当然，这不意味着 6G 移动通信技术将完全脱离 5G 移动通信技术，6G 是建立在 5G 的基础之上，属于 5G 移动通信技术的全面优化和拓展延伸，并汇集了 5G 所未涉及的技术领域。预计 6G 基站将同时接入上千个无线连接且其容量可高达 5G 基站的 1000 倍，下载速度预计可达 1TB/s，通信网延迟也可能从毫秒降到微秒级。6G 移动通信将在高速通信、卫星雷达、物联网等十余个领域起到核心作用。

### 1.2 网络信息技术的发展趋势

网络信息技术作为全球创新最活跃、应用最广泛、影响力最大的技术领域，是经济社会发展的重要基础和关键支撑。当前，移动通信技术与人工智能、大数据、云计算等新一代网络信息技术加速融合，工业互联网、车联网、物联网等新型应用空间持续拓展，融合、智能、开放、泛在将成为未来网络信息技术的发展方向<sup>[2]</sup>。这四大特点分别体现在：

（1）融合：ICDT 深度融合将催生网络信息技术的突破，网络信息技术各领域加速创新与融合，信息技术（IT）、通信技术（CT）、数据技术（DT）间的耦合度和关联性显著增强，数字化、网络化、智能化不断催生新的技术方向和发展空间。

（2）智能：人工智能将推动网络进入智能化时代，随着网络传输能力、数据计算效能、信息存储容量的快速提升，人工智能技术将渗透到各行各业，并开始与实体经济深度融合，成为技术创新、产业转型升级的新动力和新引擎。

（3）开放：开源开放将释放网络信息技术的创新活力，“开源”改变了网络信息技术创新的路径和模式，当前，围绕网络能力的开放，网络领域的开源项目发展迅猛；“开放”是产业链成熟和良性发展的重要标志，开放可以提高技术创新活力、降低创新成本、优化产业链条，网络信息技术架构和技术体系的开放是新一代网络信息技术和产业必然趋势。

(4) 泛在：天地一体化将拓展网络信息技术的发展空间，未来的移动信息网络将实现全球深度覆盖，通过无线通信技术将空间、陆地紧密无缝连接。在网络连接形态上，可通过蜂窝、低轨星座、低空飞行器、定位卫星、近距离通信等形成多层覆盖、多网络融合的无线通信网络。

## 2.6G 技术新特点

从 1G 发展到 5G，本质上是信息化、规模化引发的质变。6G 除了完成基础的连接之外，还将体现“以人为本”，即从用户体验角度来设计新一代网络，用户体验更多地转变为用户对应用层和内容层的认知和感受<sup>[3]</sup>。

### 2.1 覆盖性

6G 能实现“空天地海”融合，消除信号死角，真正便利用户实现全方位地流畅接入网络。例如，为了解决现有的地面通信系统覆盖面不足的问题，6G 会引入空天通信系统（如卫星通信系统）提高覆盖面，但卫星通信系统又存在着容量不足的问题，因此需要将地面通信系统的大容量与卫通信系统的高覆盖结合起来，形成混合式组网。未来空天地一体化通信网络典型的应用场景广泛，图 1 为天地一体化信息网络结构模型。将提供全球无缝覆盖通信服务，包括偏远的乡村、沙漠、海洋、湖泊、岛屿、无人区、山区等传统地面基站无法覆盖到的区域。

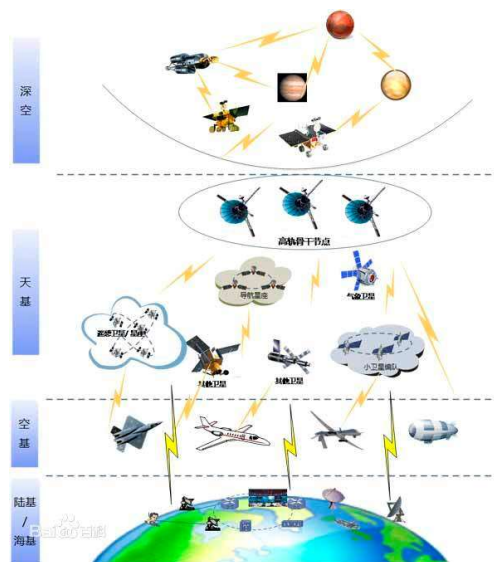


图 1 天地一体化信息网络（摘自百度百科）

### 2.2 开放性

6G 允许人和物随时随地接入网络，快速参与数据交换，而不会受到一直以来存在的网络异构问题的困扰。建网和组网速度可以匹配精益开发的需求，通过人工智能的调度，实现人和物大规模同时接入，而不会造成拥塞。

### 2.3 安全性

6G 对于数据进行端到端的安全等级预判和分类，也支持用户自定义策略，从而保障终端设备、空中接口、数据传输、用户感知（应用层和内容层）等方面的安全。同时，6G 面向的是差异化的业

务场景，除了要满足最基本的通信安全需求，还需要为不同的业务场景提供差异化的安全服务，使其能够适应多种传统或新型网络接入方式，保护用户隐私，并支持开放可调度的安全能力。

## 2.4 自生性

6G 会与人工智能的技术体系进行结合，通过人工智能实现 6G 的自感知、自学习、自优化，从而实现自演进。主要体现在以下几个场景：

（1）由用户体验驱动的网络规划：网络规划的质量对网络建成并投入使用后的用户体验影响很大，进而关系到网络运营的投资回报。传统的网络规划聚焦于相对容易预测的业务，并且规划的颗粒度很粗。人工智能中的机器学习和预测型建模可以提高网络规划的质量，使得网络在可预见的时期内更好地满足实际需求并保证较好的用户体验。

（2）自适应和自优化的承载网络：如何在极端条件下仍可以管理和分配资源以满足流量需求，是在设计承载网络时面临的一个基本挑战。传统的解决办法是基于知识和经验对网络流量进行分析和模拟，制定具有针对性的策略。6G 承载网络应具备自学习和自适应能力，通过对过往行为模式、输出结果以及同一网络或其他网络上的类似实体的行为进行学习，将有助于网络决策质量持续提高。

（3）主动式网络监测和故障分析：网络监测是网络运营的关键任务。目前主要是通过告警对网络进行监测，但总体仍处于被动。网络维护人员一般根据故障排除手册分析故障成因，但存在诸多局限性。众所周知，有多种原因可导致新的网络故障产生，而这些故障需要经验丰富的工程师花费较多时间进行排查，这一过程可能会持续很长时间，从而引起客户不满。通过运用诊断型分析技术，可以快速、准确地分析故障并做出多种预测，甚至在故障发生之前将其化解。

（4）主动式的网络安全防护：承载网络正面临日益增多的安全事件，这些事件引发的网络中断和数据丢失问题造成经济损失和用户流失。基于机器学习的行为分析将显著地提高网络检测攻击、自动分析数据和识别孤立行为之间关系的能力，从而建立强大的网络安全防护。

## 3. 全球 6G 研究进展

### 3.1 国际标准化组织

(1) 国际电信联盟 (ITU)：根据 ITU 工作计划，2019 年的 RA-19 会议不会设立新的 IMT 技术研究决议，表明在 2019 年到 2023 年研究周期内，仍主要是面向 5G 和 B5G 技术开展研究，但 2020 年到 2023 年将开展 6G 愿景及技术趋势研究。

(2) 第三代合作伙伴计划 (3GPP)：2018 年 6 月，3GPP 已经完成了 5G 第一版本国际标准 (R15) 的研制，重点支持增强移动宽带场景和超高可靠低时延场景；预计 3GPP 将于 2023 年开启对于 6G 的研究，实质性 6G 国际标准化预计将于 2025 年启动。

(3) 电气和电子工程师学会 (IEEE)：IEEE 于 2016 年 12 月发起了 IEEE 5G Initiative，并于 2018 年 8 月更名为 IEEE Future Networks，目标为使能 5G 及未来网络。当前 IEEE 已经开展了一些面向 6G 的技术研讨，2019 年 3 月 25 日，在 IEEE 发起下，全球第一届 6G 无线峰会在荷兰召开，邀请了工业界和学术界发表对于 6G 的最新见解，探讨实现 6G 愿景需应对的理论和实践挑战。

### 3.2 部分国家/地区的 6G 研究进展

(1) 欧盟：2017 年，欧盟发起了 6G 技术研发项目征询，旨在研究下一代移动通信关键技术。欧盟对 6G 的初步设想是峰值速率要大于 100 Gbit/s，单信道带宽达到 1GHz，使用高于 275GHz 的太赫兹频段。9 月欧盟启动了为期 3 年的 6G 基础技术研究项目，主要任务是研究可用于 6G 网络的下一代纠错编码、先进信道编码及调制技术。此外，欧盟还启动了多个太赫兹研发项目。

(2) 美国：美国联邦通信委员会 (FCC) 2019 年 3 月宣布开放面向未来 6G 网络服务的太赫兹频段 (95 GHz—3 THz)，用于 6G 技术试验使用。此外，2018 年 9 月在“2018 年世界移动通信大会——北美”峰会上，FCC 专家提出了 6G 的三大类关键技术，包括全新频谱（太赫兹频段）、大规模空间复用技术（支持数百个超窄波束）、基于区块链的动态频谱共享技术等。

(3) 日本：将开发太赫兹技术列为“国家支柱技术十大重点战略目标”之首，2018 年 7 月，日本经济新闻社报道称，日本 NTT 集团已成功开发出了面向 B5G 和 6G 的新技术，一个是轨道角动量 (OAM) 技术，另一个是太赫兹通信技术，峰值传输速率达到了 100 Gbit/s。

(4) 韩国：SK 电讯 ICT 研发中心的专家 2018 年 10 月在美国纽约大学举行的前沿技术研讨会上，提出未来 6G 网络的 3 大赋能技术，包括太赫兹通信、去蜂窝架构（完全虚拟化的 RAN+大规模天线）和非地面无线网络三大技术方向。此外，SK 电讯还与爱立信、诺基亚两家设备制造企业达成协议，合作开发 6G 相关技术。


### 3.3 中国 6G 研究进展



目前国内 IMT2020 新技术工作组已开始开展 6G 的总体研究,科技部 2018-2019 重点专项中 11 项与 6G 相关。2019 年 4 月 26 日,毫米波太赫兹产业发展联盟在京成立,该联盟由信通院与产业界、科研院所等相关企业和专家共同筹建,旨在加快我国毫米波太赫兹产业发展。同时由国家发改委、工信部、科技部共同支持举办的未来移动通信论坛(“Future 论坛”)已发布《ApeakBeyond5G》等 3 本 6G 相关白皮书。ITU-T 启动的 FGNET2030 研究,中国运营商也深度参与。2019 年 11 月 6 日,6G 技术研发工作启动会召开,国家 6G 技术研发推进工作组和总体专家组正式成立。

2018 年 10 月 26 日,科技部发布“宽带通信和新型网络”重点专项 2018 年度项目,专项实施周期为 5 年(2018-2022 年),总体目标是“使我国成为 B5G 无线移动通信技术和标准研发的全球引领者。涉及 B5G/6G 无线移动通信技术和标准研发的项目一共有 5 个:大规模无线通信物理层基础理论与技术(基础前沿类);太赫兹无线通信技术与系统(共性关键技术类);面向基站的大规模无线通信新型天线与射频技术(共性关键技术类);兼容 C 波段的毫米波体化射频前端系统关键技术(共性关键技术类);基于第三代化合物半导体的射频前端系统技术(共性关键技术类)。

同时,在我校北京科技大学张海君老师的实验室也已经在研究 6G 移动通信,从学校官网获取信息和谷歌学术获取最新研究结果如图 2 所示。主要是对子信道分配、功率分配、资源优化与管理的一些新型算法的研究,为超密集异构蜂窝网络结构和非正交多址接入(NOMA)提供了前沿的指导。

 <div>张海君 Zhang Haijun</div>	系 所:	通信工程系		
	职 称:	教授 博士生导师		
	职 务:			
	办公地点:			
	办公电话:			
	电子邮箱:	zhanghaijun@ustb.edu.cn		
本 科 课 程:	多媒体通信技术 移动通信 (双语)			
研究生课程:	云计算与服务科学			
科 研 方 向:	6G移动通信  人工智能与无线网路; 机器学习与大数据			
学术与社会兼职:	IEEE Transactions on Communications编委 IEEE Transactions on Green Communications			

Subchannel Assignment and Power Optimization for Energy-Efficient NOMA Heterogeneous Network		2019
X Chu, H Zhang, W Huangfu, W Liu, Y Ren, J Dong, K Long 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 1-6		
Distributed DNN Based User Association and Resource Optimization in mmWave Networks		2019
H Zhang, H Zhang, W Huangfu, W Liu, J Dong, K Long, A Nallanathan 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 1-5		
User Association and Power Allocation Based on Q-Learning in Ultra Dense Heterogeneous Networks		2019
D Li, H Zhang, K Long, W Huangfu, J Dong, A Nallanathan 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 1-5		
QoS Driven Power Allocation in Secure Multicarrier Full-Duplex Relay System		2019
Z Bai, S Liang, P Ma, Y Dong, H Zhang, Y Ma IEEE Transactions on Wireless Communications		
Deep Neural Network for Resource Management in NOMA Networks		2019
N Yang, H Zhang, K Long, HY Hsieh, J Liu IEEE Transactions on Vehicular Technology		
Energy Efficient Resource Management in SWIPT Enabled Heterogeneous Networks with NOMA		4 2019
H Zhang, M Fang, K Long, GK Karagiannis, VCM Leung, HV Poor IEEE Transactions on Wireless Communications		
Stochastic ADMM based distributed machine learning with differential privacy		2 2019
J Ding, SM Errapothu, H Zhang, Y Gong, M Pan, Z Han International Conference on Security and Privacy in Communication Systems ...		
Cooperative Computing in Integrated Blockchain Based Internet of Things		3 2019
S Fu, Q Fan, Y Tang, H Zhang, X Jian, X Zeng IEEE Internet of Things Journal		

图 2 张海君老师研究方向及基本信息(左)和最新研究结果(右)

## 4. 6G 关键技术

### 4.1 太赫兹通信技术

#### 4.1.1 太赫兹技术概要

太赫兹是指频率在 0.1THz~10THz 的电磁波，具有极为丰富的频谱资源，可用频谱资源甚至可达数十 GHz，可满足 100Gbit/s 到 1Tbit/s 级的极高传输速率频谱需求，是未来移动通信中极具潜力的无线通信技术，表 1 呈现了 6G 相关参数。太赫兹通信由于频段高、波长短，单位面积可以集成大量的天线阵元，利用波束赋形技术可有效补偿路径损耗，满足密集组网覆盖需求。太赫兹通信具有独特的技术优势，但当前仍然面临诸多方面的挑战，其中最重要的是太赫兹器件成熟度不高，固态太赫兹功率放大器的输出功率无法满足大覆盖需求，太赫兹相控阵天线尚未突破，高指向性太赫兹波束对准和动态跟踪也有待研究。基于射频模块的太赫兹通信系统小型化程度不够，无法满足地面通信应用场景的要求<sup>[4]</sup>。

表格 1 6G 移动通信参数<sup>[5]</sup>

序号	属性	参数值
1	用户体验速率	10~100Gbit/s
2	误码率	<0.0001
3	移动性	1000km/h
4	标准频谱	0.095~3THz
5	国内通信频段	0.095~3THz
6	传输手段	THzWave
7	波长	0.03~3mm
8	可支持接入速率	>100Gpbs

太赫兹波段在电磁波谱中的位置如图 3 所示，可以看出其所处的位置是比较特殊的，因此太赫兹有很多优越的特点<sup>[6]</sup>：

(1) 太赫兹的波长在微波与红外光之间，因此与微波、毫米波相比，太赫兹在探测时可以获得更好的分辨率；与激光相比，太赫兹的搜索能力更好、搜索范围更大。

(2) 太赫兹的频率最高可达 10T 赫兹，因此它具有较高的穿透能力，可对不透明物体进行透视成像。

(3) 太赫兹的瞬时带宽较宽 (0.1~10 THz)，因此它的数据瞬时传输速率非常大，可达数十 Gbit/s。

(4) 太赫兹单个脉冲的频带比较宽，范围从几百 GHz 到几 THz，因此它可以用于定性鉴别一些分子结构。

(5) 太赫兹波的光子能量比较低, 只有几毫电子伏特, 是 X 射线光子能量的百万分之一, 因此它不容易破坏被检测物质。

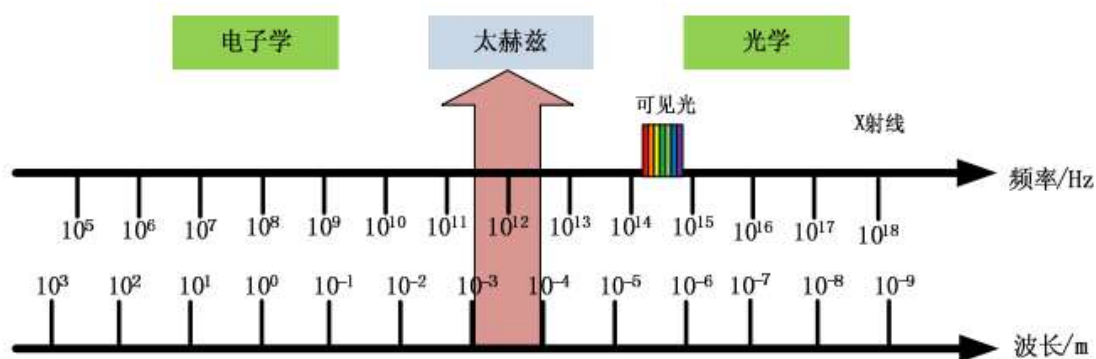


图 3 太赫兹波在电磁波谱中所处的位置

#### 4.1.2 太赫兹辐射影响

太赫兹具有前所未有的优势, 优点不容置疑, 但是对于人们所关注与健康相关的辐射问题, 太赫兹频段的通信产生的辐射能否为大众接受。文献[7]通过 CST 软件, 仿真计算了 6G 基站天线对人体的辐射还是很大的, 并给出建议: 长间接打 6G 信号的手机, 还是采用耳机以保护大脑。文献[8]-[9]通过太赫兹辐射大鼠海马神经元, 通过实验测试了太赫兹辐射通过调节海马神经元内带电离子的浓度促使其兴奋, 但是该项研究主要是说明太赫兹可用于生物医学研究, 但也说明该辐射确实能对大脑神经元产生一定影响。

当然, 产生辐射是毋庸置疑的, 但是毕竟科技是把双刃剑, 弊端都是可以防控并减小其影响, 科技的进步还是全人类所向往追求的。

#### 4.1.3 太赫兹通信技术相关工作

对于太赫兹毫米波的产生与发射应当有电路设计改造产生稳定的毫米波, 天线改造能够合理的辐射毫米波, 以及相关辐射材料与合成或分配算法的研究。下面将对这些方面工作的进展进行总结。

在电路设计改造方面, 史少辉等人<sup>[10]</sup>通过设计 130GHz 回旋振荡管的注波互作用电路, 基于线性理论对互作用电路进行了研究并选择了合适的工作点, 利用相对论电子回旋脉塞非线性理论对互作用系统进行了模拟和计算, 优化了工作参数, 最终实现振荡管的频率可调范围约为 2.7GHz。关晓通等人<sup>[11]</sup>基于一种新型高频互作用结构, 即双共焦波导结构, 设计了一种 330 GHz 二次谐波双共焦结构回旋管谐振腔并对其进行了理论分析和粒子模拟, 研究结果表明其具备工作在太赫兹波段的潜力。马宏



宇等人<sup>[12]</sup>设计了基于科赫曲线分形结构太赫兹带通滤波器,滤波器的谐振频率为 0.715 THz, -3 dB 带宽为 21.9 GHz。胡广尧等人<sup>[13]</sup>基于超材料结构设计制造并表征了一款工作在 0.34 THz 频率下的太赫兹电光调制器。通过电压调制信号调制太赫兹波,实现了调制深度从 9%增加到 50%,其调制速度达到 30 kHz。汪柏康等人<sup>[14]</sup>设计了基于 CMOS 工艺的太赫兹振荡器,采用台积电 40 nm CMOS 工艺,基波工作频率为 154.5 GHz,输出二次谐波为 309.0 GHz,频率调谐范围为 303.5~315.4GHz。李田睿等人选取适当的滤波器结构形式,设计加工了 110 GHz 的感性窗耦合波导滤波器,其中心频率为 110 GHz,相对带宽为 5%。牛斌等人<sup>[16]</sup>突破了 T 型阳极肖特基接触工艺、低势垒器件钝化保护、大长宽比阳极空气桥制备等关键技术,实现了截止频率  $f_T$  达 11 THz 的 InGaAs 零偏工作太赫兹检波二极管研制,由零偏结电容及总电容推算的器件截止频率达 11.0 THz/7.7 THz。杜浩等人采用 HFSS-MATLABAPI 脚本库,利用 HFSS 对于场仿真的精确性,同时在 MATLAB 中基于遗传算法对结果进一步优化,采用该方法设计了 210~230GHz 带通滤波器。

在天线设计方面,熊中刚等人<sup>[18]</sup>针对微结构光电导天线与飞秒激光之间相互作用效应以及辐射太赫兹波调控问题进行了研究,模拟仿真分析了微结构 S 型光电导天线太赫兹波辐射调控机理,通过设计 S 型光电导天线获得辐射峰值频率调整范围为 0.50~0.80 THz 之间。朱忠博等人<sup>[19]</sup>报道的太赫兹波束回溯天线阵列可为灵活捷变的波束跟踪提供良好解决方案,该天线阵列接收 40GHz 的导频信号,回溯波束传输的信号是 120GHz,仿真结果表明文中所述具有三明治堆叠结构的阵列可成功实现入射波的回溯功能。刘喆等人<sup>[20]</sup>提出了一套完整的太赫兹透镜天线组设计方法,利用 ZEMAX 优化透镜天线组的内部参数,最后利用电磁场高频仿真软件 FEKO 验证衍射效应的影响并计算系统的分辨率和近场增益。姚文龙等人<sup>[21]</sup>设计了一种工作在太赫兹(THz)频率下的微带八木(QYU)天线,具有非常快的调制速度和非常低的回波损耗,该天线非常适合于相控阵雷达等 THz 波束可重构。

在相关辐射材料与合成或分配算法的研究方面,王珊珊等人<sup>[22]</sup>提出了基于多双漂移雪崩管的分立腔体倍频方法,在此基础上设计和实现波导结构的太赫兹功率合成器,在倍频器的输入端对各独立激励源的中频信号进行移相,完成倍频输出的精确相位控制,从而实现各单元输出的太赫兹信号同相位合成。姚玉坤等人提出一种太赫兹无线网络中基于中继的高效双信道 MAC 协议,该协议分为中继辅助和自适应减少控制开销机制,通过这两种机制可达到提高消息传输成功率、提升网络整体吞吐量、减少控制开销和提高信道利用率的效果。

在太赫兹通信技术方面,最新的研究在这三个方向上都有很大进展,一定程度上为 6G 移动通信技术发展奠定了一定的基础。

## 4.2 空间复用技术

### 4.2.1 空间复用概述

6G 移动通信将使用空间复用技术，6G 移动通信基站可以同时接入上千个无线外部连接，容量将达到 5G 的 1000 倍。MIMO 技术是通过增加天线的数量构造多天线阵列来补偿高频路径上的传输损耗，空间复用技术的作用是在 MIMO 多天线的阵列配置下提高传输数据量。高速率的数据流在信号的发射端被分割为多个低速率的子数据流，分割得到的不同子数据流在不同的天线上以相同的频段发射出去，又因为发射和接收端天线阵列之间的空域子信道不同，接收天线能够区分这些同频并行的子数据流，故不再需要消耗额外的频率或时间来识别这些数据流。

### 4.2.2 MIMO 技术概述

多进多出（multiple input multiple output, MIMO）是为极大地提高信道容量，在发送端和接收端都使用多根天线，在收发之间构成多个信道的天线系统。MIMO 无线通信系统是移动与无线通信系统的关键技术之一。MIMO 系统的一个明显特点就是具有极高的频谱利用效率，在对现有频谱资源充分利用的基础上通过利用空间资源来获取可靠性与有效性两方面增益，其代价是增加了发送端与接收端的处理复杂度。下面给出与 MIMO 相关的定义。

**定义 1：**分集增益<sup>[25]</sup>分集技术是研究如何充分利用传输中的多径信号能量，以改善传输的可靠性，是一项研究利用信号的基本参量在时域、频域与空域中，如何分散开又如何收集起来的技术。分集增益就是在某一累积时间百分比内，分集接收与单一接收时的收信电平差。这一电平差越大，分集增益越高，说明分集改善效果越好。

**定义 2：**波束成形<sup>[26]</sup>源于自适应天线的一个概念。接收端的信号处理，可以通过对多天线阵元接收到的各路信号进行加权合成，形成所需的理想信号。波束成形是天线技术与数字信号处理技术的结合，目的用于定向信号传输或接收。

**定义 3：**空时分组码（Space-time block code）<sup>[27]</sup> 在无线通信中使用的技术，用于在多个天线上发送数据流的多个副本，并利用各种接收的数据版本来提高数据传输的可靠性的一种编码。

**定义 4：**大规模 MIMO 技术<sup>[28]</sup> 就是将传统 MU-MIMO 基站端天线数目增加一个数量级，会在基站端安装几百根天线（128 根，256 根或者更多），从而实现几百根天线同时收发数据。

关于 MIMO 技术的演进，现今大规模 MIMO 技术研究与应用广泛，研究人员提出了不少设计方案，也是当前 5G 的核心技术之一。

### 4.2.3 空间复用技术相关工作

关于空间复用技术，现今的研究方向大多数从算法层面和编码层面两个方面进行，下面对目前最新的研究进展进行总结。

在算法研究的层面，喻雨微等人<sup>[29]</sup>基于 RI 和 SNR 的自适应切换机制进行介绍和分析，设计自适应切换算法并实现了开环空间复用内部分集与复用的切换。文献[30]通过调节网络节点发送功率与空闲信道评估的阈值，来降低干扰，提升网络空间复用度，根据用户与网络接入点不同的相对位置，将用户与特定无线接入点相关联；再利用控制器的全局视野，动态调节无线接入点的参数，最终实现网络性能的优化。文献[31]针对毫米波容易被人体等物体遮挡发生中断的特点，提出了一种多跳毫米波网络的空间复用方案，当链路发生中断时，采用中继机制进行通信的策略。张全君等人<sup>[32]</sup>基于相关性和 SINR 的 MIMO 自适应传输模式切换的方案，根据信道状态在空间复用、波束成形和双空时发送分集几种模式之间进行自适应切换。文献[33]研究了密集毫米波网络内的链路调度和空间复用方法，提出了多 BSS(Basic Service set)协调调度方案，设计了基于贪婪算法的多链路同传调度算法，通过仿真表明其方法能够有效减少调度时间，提升系统吞吐量。文献[34]基于 GNU Radio 和 USRP 软硬件平台，结合 3GPP R9 标准，设计实现了 LTE 下行  $2 \times 2$  MIMO 空间复用系统。

在编码研究的层面，林欢等人<sup>[35]</sup>提出一种联合相位旋转和功率分配的 OSM 改进预编码方案，对发射信号进行旋转操作实现发射符号间的正交化，然后基于最大化最小欧式距离准则确定联合预编码相关的最优参数，设计相位旋转矩阵和功率分配矩阵，最后利用发射信号的正交性简化最大似然检测。文献[36]分析了传统的通过设计外层预编码以消除小区间和簇间干扰，并没有对小区中心用户和边缘用户加以区分的弊端，在两阶段预编码的框架中，构造了基于干扰对齐和软空间复用的多小区协同传输方案，针对用户信道特性的差异性为小区中心用户和小区边缘用户配置不同的传输策略。

空间复用技术的研究很早就在研究中，方法策略也都不断升级，效果也逐渐突出，随着空间复用技术的进一步发展，相信 6G 会在空间复用技术上实现新的突破。

## 4.3 “空天地”一体化通信

在传统蜂窝网络基础上，将卫星通信、短距离通信等非蜂窝网络进行系统架构、通信协议和信息的融合，可构建起全面覆盖、立体分层、全时空统一服务的新型网络，覆盖太空、空中、陆地、海洋等自然空间，实现多层覆盖、多网融合的高速宽带无线通信网络。

针对空天地一体化通信，业界研究主要是对网络结构设计与相关应用场景下的针对性的设计。文献[37]针对由卫星通信网络、地面移动网络以及空中飞行平台所组成的空天地一体化网络(HSAT)下行链路的系统吞吐量问题，提出了基于多目标遗传算法的地面基站选择及功率分配算法，在保证用户最低通信需求的前提下，有效提升了系统的吞吐量。朱厉洪等人<sup>[38]</sup>从网络组成、网络特点、组网设计、通信协议设计和应用场景五个方面对空天地一体化网络进行设计，给出了相关的指导策略。石怀峰等人<sup>[39]</sup>针对卫星节点移动性带来的路径改变问题，利用卫星节点位置有规律变化的特性，设计了一种基于虚拟位置的卫星节点静态处理机制 BVL (Based on Virtual Location)，先设定卫星的虚拟位置节点，然后将内容副本提前向虚拟位置节点同一轨道的后方卫星节点进行缓存，从而规避卫星节点的移动性。

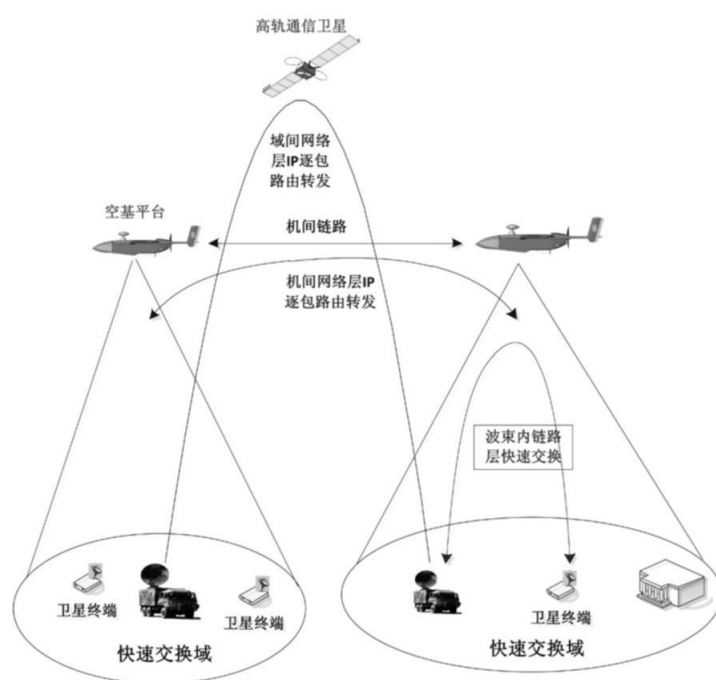


图 4 空天地网络路由交换域示意图<sup>[38]</sup>

同时，针对一些特有的应用场景，很多研究人员也给出了网络设计的指导。张凯等人在文献[40]中给出了矿区地表移动观测的“空天地”一体化监测技术，为研究矿区开采影响规律、损害防治、矿区地质灾害预警、开采减损方案设计或优化的提供了指导。刘宇等人<sup>[41]</sup>针对生产建设项目施工带来的水土流失和生态环境破坏日益严重的问题，通过借助“天地一体化”监管技术和信息化手段，基于高分辨率遥感影像的图斑叠加，能更加迅速、准确、实时地找出问题项目，切实解决传统监管“发现不及时、掌握不全面”的难题，为生态文明建设提供扎实的技术保障和有力支撑。刘欢等人<sup>[42]</sup>通过分析总结传统铁路勘察技术、新型勘察技术的应用特点及主要应用范围，提出了针对复杂艰险山区铁路各阶段勘察要求的“空天地”三位一体化勘察技术组合原则，并以成昆铁路复线甘洛至喜德段为试验区，应用多种“空天地”勘察技术，研究形成“空天地”勘察技术体系应用流程方案。

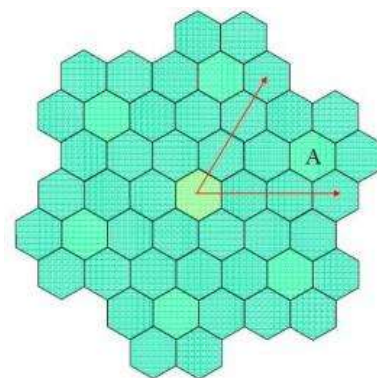
同时，针对一些特有的应用场景，很多研究人员也给出了网络设计的指导。张凯等人在文献[40]中给出了矿区地表移动观测的“空天地”一体化监测技术，为研究矿区开采影响规律、损害防治、矿区地质灾害预警、开采减损方案设计或优化的提供了指导。刘宇等人<sup>[41]</sup>针对生产建设项目施工带来的水土流失和生态环境破坏日益严重的问题，通过借助“天地一体化”监管技术和信息化手段，基于高分辨率遥感影像的图斑叠加，能更加迅速、准确、实时地找出问题项目，切实解决传统监管“发现不及时、掌握不全面”的难题，为生态文明建设提供扎实的技术保障和有力支撑。刘欢等人<sup>[42]</sup>通过分析总结传统铁路勘察技术、新型勘察技术的应用特点及主要应用范围，提出了针对复杂艰险山区铁路各阶段勘察要求的“空天地”三位一体化勘察技术组合原则，并以成昆铁路复线甘洛至喜德段为试验区，应用多种“空天地”勘察技术，研究形成“空天地”勘察技术体系应用流程方案。

针对特有场景铺设“空天地”网络的方案在不同场景下有所区别，但未来随着北斗系统的完善，将卫星通信融入这一网络中，这些方案也都有一定的参考价值，为 6G 实现完全的“空天地”一体化通信，实现通信无死角打下一定的基础。

#### 4.4 超密集蜂窝网络技术



蜂窝网络（Cellular network），又称移动网络（mobile network）是一种移动通信硬件架构，分为模拟蜂窝网络和数字蜂窝网络。由于构成网络覆盖的各通信基地台的信号覆盖呈六边形，从而使整个网络像一个蜂窝而得名，如图 5 所示。常见的蜂窝网络类型有：GSM 网络（有些国家叫 pcs-1900）、CDMA 网络、3G 网络、FDMA、TDMA、PDC、TACS、AMPS 等。



异构蜂窝网络<sup>[43]</sup> — 图 5 蜂窝网络（摘自百度百科）

般由各种基础架构组成，例如宏基站，微基站、微微基站，中继和终端直通（Device-to-Device, D2D）系统等，其中不同层中的基站具有不同的发射功率和覆盖范围，具体来说，宏蜂窝利用较高的功率来提供较大的覆盖范围，而毫微微蜂窝通常以一种低功率用于短距离通信。超密集异构蜂窝无线网络在异构蜂窝网络的基础上引入了大量低功率节点，扩大了网络容量，如图 6 所示。

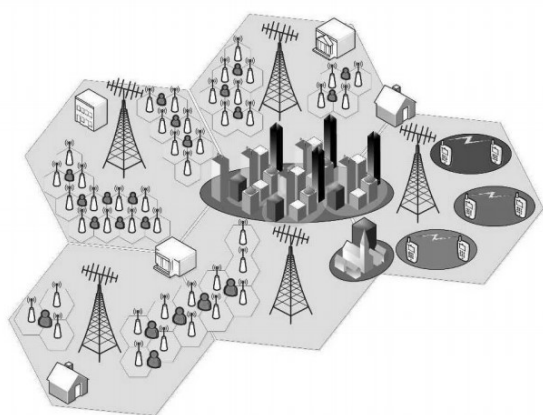


图 6 超密集异构蜂窝无线网络架构<sup>[43]</sup>

关于超密集蜂窝网络，文献[44]指出密集蜂窝网络局部拓扑结构具有动态性的特点，导致对网络中各小基站覆盖小区的频谱资源管理适合以分布式、自组织的方式进行，以便使得分配给各基站的频谱资源能够及时适应网络拓扑的动态变化，为用户提供有保障的服务质量，针对未来密集蜂窝网络中的频谱资源管理以及网络建模和性能分析问题进行了研究。田飞燕等人<sup>[45]</sup>通过对 6G 物联网中大规模接入技术的分析和研究，特别是结合物联网业务的偶发特性，设计了一个基于免授权随机接入协议的新型接入架构，以促进在有限频谱资源内实现高效的大规模接入。

超密集蜂窝网络作为下一代移动通信的架构，在 5G 也有一定的应用，相信未来 6G 在蜂窝网络更加密集的程度给出更好的资源分配与功率分配等策略。

#### 4.5 其它潜在技术

除了上面介绍的技术外，还有一些潜在的技术在 6G 发展中也可能有所贡献。

可见光通信技术的高速发展，当前日本、美国、德国、意大利等国的高校及科研机构开展了可见光通信技术研究，试验样机的峰值传输速率已超过了 10 Gbit/s。可见光通信当前主要的应用瓶颈在于可见光收发器件，一方面发射机的调制带宽只有大于毫米波，可见光才有应用优势，另一方面，检测



器带宽和灵敏度还比较低，难以满足 NLOS 场景下的检测需求。<sup>[4]</sup>突破了这些瓶颈也可能成为 6G 潜在的关键技术。

轨道角动量技术<sup>[4]、[46]</sup>利用具有不同本征值的涡旋电磁波的正交特性，通过多路涡旋电磁波的叠加实现高速数据传输，为移动通信提供了新的物理维度。轨道角动量技术分为量子态轨道和统计态两种模式，目前在无线通信中的应用仍处于探索阶段。轨道角动量技术在光领域已经有所应用，美国与日本在轨道角动量领域的研发处于领先地位，日本 NTT 集团 2018 年宣称已实现 11 路涡旋电磁波的叠加传输，峰值传输速率达到了 100 Gbit/s。我国清华大学完成了世界首次微波频段轨道角动量电磁波 27.5 km 长距离传输实验。当前，轨道角动量在无线通信中应用仍面临挑战，如业界尚未突破轨道角动量微波量子产生与耦合设备小型化技术，射频统计态轨道角动量传输技术也面临正交涡旋电磁波的产生、涡旋电磁波的检测与分离以及如何降低传输环境对涡旋电磁波影响等问题。

全双工技术<sup>[4]、[47]</sup>随着无线通信业务量爆发与频谱资源短缺的矛盾日益突出，提升频谱效率，消除传统 TDD/FDD 模式的频谱资源使用与管理方式的差异性，成为移动通信发展演进的目标之一，全双工技术将成为解决这一问题的潜在技术方案。全双工利用自干扰消除技术在收发链路之间实现灵活频谱资源利用，达到提升吞吐量及降低传输时延的目的。目前全双工技术已经形成了空域、射频域和数字域联合的自干扰抵制技术路线，空域自干扰抵制主要依靠天线位置优化、空间零陷波束等技术手段实现空间自干扰的辐射隔离；射频域自干扰抵制通过构建与接收自干扰信号幅相反的对消信号，在射频模拟域完成抵消；数字域自干扰抵制针对残余的线性和非线性自干扰进一步进行重建消除。当前业界全双工自干扰抵制能力已经超过了 115dB，可满足小功率简单场景下的全双工通信需求。但全双工技术在实用化过程中，仍面临大功率动态自干扰抵制、多天线射频域自干扰抵制、全双工组网技术以及全双工核心器件芯片等问题。

## 5. 6G 愿景与技术展望

### 5.1 6G 网络技术对世界图景的改变

移动通讯不但改变了人类的交流方式，同时也改变了人们的世界观和世界图景。1G 通过移动的声音改变了通话方式，2G 通过短信这一即时文字改变了人们的文字交流方式，3G 通过图像改变了人们的图像交流方式，4G 通过视频社交改变了人们的生活方式，5G 将通过物联网改变产业方式和社会生

活，而 6G 将使天地海空智慧链接来彻底改变世界的关联方式，从而建构出一幅全新的世界图景。主要体现在以下几个方面<sup>[48]</sup>：

- (1) 世界万物的“路径”长度变短，整个世界成为真正的“小”世界。
- (2) “普遍联系”的辩证法理想将得到技术的全面实现。
- (3) 万物智联，智慧在场。

## 5.2 6G 网络技术对科学认知的改变

6G 时代的来临将给科学认知方式带来全面的重大变革。我们要对世界万物皆有精准认识，首先必须取得相关数据，然后在数据的基础上发现规律，解释过去并预测未来。世界万物如此丰富多彩，真正被我们进行科学观测和可控实验并由此取得科学认知的事物仅占极少数。人工观测和实验范围有限，观测与实验的技术手段也受到时代的限制。6G 时代相当于万物用上了智能手机，通过物联网的智能终端，人们可以更加方便地进行观测、沟通、交流和认识。通过智能芯片，万物可被数据化，因此万物将变得可测量。在 6G 网络、大数据、人工智能、边缘计算等技术的支持下，天地海空这个“世界大黑箱”将逐渐被打开，整个世界将变得可测量、可认知、可控制、有智慧，即将成为一个巨大的科学实验室，天地海空将成为最大的实验场景。有了刻画万物状态及其变化的海量数据，我们从中可以发现事物发展、变化的相关性规律，并利用这些规律对事物的未来方向进行精准预测。

## 5.3 6G 网络技术对社会生活的改变

6G 时代无盲区的网络体系以及海量的感知数据不但将彻底改变人类对世界的认知，更为重要的是将彻底改变我们的经济和社会生活。6G 网络通过改变事物之间的联系方式从而改变事物之间的相互关系、相互作用，而事物一旦通过信息有了相互作用，将产生一系列的影响，万物智慧化，万物相互联系、相互作用，人类社会将变得万物皆可沟通，万物为我所用的社会新图景。首先，6G 将极大地提高生产力，从而改变社会的生产方式；其次，6G 将带来社会生活的变革，从而改变人们的生活方式；最后，6G 网络让世界变得更加智慧，智能化、自动化得以普及，因而带来人类更加全面的解放与自由。

## 5.4 6G 新型技术展望

人工智能更好地融入 6G 使能技术从而带来全新的动力，移动通信发展一直领先于人工智能，最近几年随着硬件计算能力和神经形态计算理论的不不断提升和完善，人工智能得到迅猛发展<sup>[1]</sup>。未来应

用场景对网络的交互性、灵活性和可靠性有更高要求，依靠孤立的网络系统不能达到数字协同效果。在后摩尔时代，计算芯片算力趋于饱和，需要研究仿生计算模式，发展逼近人脑信息处理能力的神经形态计算和类脑计算。同时，网络架构和计算模型也亟需从逻辑运算向人工智能运算转变。将神经网络和深度学习应用到智能频谱感知和智能信道估计等射频领域，可以获得传统无线网络所不具备的能力。文献[49]将通信系统看作一个能进行深度学习的自动编码器，将无线转换网络作为专家系统一部分的加入到机器学习模型中，并重建一套端到端通信系统的传输层和物理层。以类脑计算器件和神经形态计算模型为代表的人工智能技术将成为无线通信的关键性技术之一。

通过 6G 目前地研究进展来看，对于 6G 的工作和趋势主要是进一步提高数据传输速率，减小时延，增大终端接入数量，加入人工智能，万物互联，以人文本等等。也许，在这些目前发展的技术方向上，追求信息传输速率需要从带宽和编码的角度去提升优化，在太赫兹频段拥有丰富的频带资源，也许可以在编码方式上继续改进，让单个 bit 的所承载的信息更多。将人工智能融入 6G 通信，可能除了在资源分配功率等问题上，根据用户需求提供网络性能也许也是只能分配的一个可改造方向。

## 6. 结束语

没有关键技术的创新和突破，6G 缤纷多彩的美好愿景就不能得以实现。6G 关键技术通常来自于物理基础性技术、网络基础性技术和新兴应用技术，不同技术层面都有着不同的要求。本文从多维度 and 不同的层面介绍了 6G 若干关键技术和目前相关进展，分析 6G 特点和前景。但是本文参考的文献几乎全为中文文献，对最新英文文献没有总结，相信英文文献中的相关工作会更加优秀突出，在技术上有全新的突破和更加新颖的指导思路。

通过本次报告调研，对 6G 现状有了深入了解，在未来的科研路上，在研究生选取研究方向上也有了一定的指导作用，也感谢张海君老师几周课程的指导，对移动通信有了全新的认识，也对未来的前进方向有了一定的新想法。

最后，祝愿中国在 6G 移动通信领域领跑世界，造福全人类！！

## 7. 参考文献

- [1] 陈亮,余少华.6G 移动通信发展趋势初探[J].光通信研究,2019(4):1-8.
- [2] 魏克军,胡泊.6G 愿景需求及技术趋势展望[J].电信科学,2020,36(02):126-129.

- [3] 牛晓敏.6G 的价值展望和技术特征[J].电信科学,2019,35(12):137-141.
- [4] 魏克军.全球 6G 研究进展综述[J].移动通信,2020,44(03):34-36+42.
- [5] 张博文,林君.6G 移动通信的技术应用及发展前景[J].河南科技,2019(29):37-38.
- [6] 刘盛纲,钟任斌.太赫兹科学技术及其应用的新发展[J].电子科技大学学报,2009.38(05):481-486.
- [7] 罗春娅. 太赫兹频段的天线辐射与 SAR 计算[C]. 中国电工技术学会电热专业委员会:锦州市光学学会,2019:296-298.
- [8] 张欣欣,何明霞,赵晋武,陈颢宇,刘立媛,卢晓云,田甜,陈孟秋,王璞.0.1 THz 辐射对大鼠海马神经元兴奋性的影响[J/OL].中国激光:1-11[2020-04-11].
- [9] 赵黎. 太赫兹波辐射对原代海马神经元结构和功能的影响研究[C]. 中国毒理学会.中国毒理学会第九次全国毒理学大会论文集.中国毒理学会:中国毒理学会,2019:275-276.
- [10] 史少辉,韩万强,封顺珍,纪登辉,王铁宁,刘迎娣.频率可调太赫兹回旋振荡管互作用电路的设计与研究[J/OL].微波学报:1-7[2020-04-11].
- [11] 关晓通,傅文杰,鲁钝,杨同斌,鄢扬,袁学松.双共焦波导结构二次谐波太赫兹回旋管谐振腔设计[J].物理学报,2020,69(06):234-243.
- [12] 马宏宇,李九生.基于科赫曲线分形结构太赫兹带通滤波器[J].光谱学与光谱分析,2020,40(03):733-737.
- [13] 胡广尧,文天龙,张怀武.硅基超材料太赫兹波电光调制器[J/OL].压电与声光:1-4[2020-04-11].
- [14] 汪柏康,徐雷钧,白雪.基于 CMOS 工艺的太赫兹振荡器[J/OL].太赫兹科学与电子信息学报:1-6[2020-04-11].
- [15] 李田睿,张波,樊勇.110 GHz 带通太赫兹滤波器设计[J].太赫兹科学与电子信息学报,2020,18(01):14-17+23.
- [16] 牛斌,范道雨,代鲲鹏,林罡,王维波,陈堂胜. $f_T=11\text{THz}$  的 InGaAs 零偏工作太赫兹检波二极管[J].固体电子学研究进展,2019,39(06):479.
- [17] 杜浩,张勇.基于遗传算法的太赫兹腔体滤波器辅助设计[J].太赫兹科学与电子信息学报,2019,17(06):950-953+970.
- [18] 熊中刚,邓琥,熊亮,杨洁萍,尚丽平.光电导天线太赫兹辐射峰值调控研究[J].强激光与粒子束,2020,32(03):84-91.
- [19] 朱忠博,胡伟东,秦涛,李升,李小军,曾姜杰,林先其,Leo P.LIGHTART.高精度太赫兹异频回溯天线阵列(英文)[J].Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2020,21(03):377-384.
- [20] 刘喆,张德海.太赫兹透镜天线组设计[J/OL].南京邮电大学学报(自然科学版),2020(01):1-5[2020-04-11].

- [21] 姚文龙,郭旭光,朱亦鸣,李萍.基于石墨烯的波束可重构太赫兹天线(英文)[J].红外与毫米波学报,2020,39(01):39-46.
- [22] 王珊珊,余晓川,朱忠博.基于多双漂移雪崩倍频管太赫兹功率合成方法[J/OL].太赫兹科学与电子信息学报:1-5[2020-04-11].
- [23] 姚玉坤,赵子军,李其超,王磊.太赫兹网络中基于中继的高效双信道 MAC 协议[J].光通信研究,2020(01):58-65.
- [24] 龚耀寰.多入多出智能天线技术[J].中兴通讯技术,2002(06):19-21.
- [25] 叶礼邦,陈登伟,郭新海.基于实时载噪比测量的分集增益测试方法[J].无线电工程,2019,49(01):91-94.
- [26] 胡耀文.多径环境下大规模 MIMO 发射端波束成形技术研究[D].南京邮电大学,2019.
- [27] 董涛.现代移动通信系统中智能天线和空时编码技术的研究[D].东南大学,2006.
- [28] 吴娴.大规模 MIMO 随机接入和信道状态信息反馈技术的研究[D].南京邮电大学,2019.
- [29] 喻雨微,王彦.MIMO 分集与复用模式自适应切换算法设计[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2018,31(02):30-35.
- [30] 朱则育.面向高空间复用的 CCA 与功率控制联合优化策略研究[D].北京邮电大学,2018.
- [31] 陈贺玮.密集场景下毫米波 WLAN 空间复用技术研究[D].西南交通大学,2019.
- [32] 张全君,吴阿沛.基于相关性和 SINR 的 MIMO 自适应模式切换[J].无线互联科技,2019,16(06):123-124.
- [33] 丁昌峰.毫米波通信中波束管理方案研究[D].西南交通大学,2018.
- [34] 王金强.基于 GNU Radio 的 LTE 下行 MIMO 空间复用技术设计与实现[D].西安电子科技大学,2017.
- [35] 林欢,李想.电力线 MIMO 系统正交空间复用联合预编码[J].广东通信技术,2018,38(04):46-50+79.
- [36] 张顺.大规模 MIMO 基于干扰对齐和软空间复用的多小区协同传输设计[C].中国科学技术协会学会学术部,2017:24-25.
- [37] 李跃.空天地一体化网络中联合地面基站选择及功率分配[J].电讯技术,2020,60(02):174-180.
- [38] 朱厉洪,史晶晶,赵扬.基于空基平台的天空地一体化通信网络研究[J].国防科技,2019,40(06):19-23+27.
- [39] 石怀峰,王成功,蔡睿妍,魏德宾.天地一体化智能网络节点静态处理与缓存策略[J/OL].计算机工程:1-9[2020-04-12].<https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0056554>.
- [40] 张凯,李全生,戴华阳,郭俊廷,阎跃观.矿区地表移动“空天地”一体化监测技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(02):207-213.
- [41] 刘宇,周娟.生产建设项目水土保持“天地一体化”监管工作探讨[J].亚热带水土保持,2019,31(04):60-64.



- [42] 刘欢,王立娟,廖紫骅,唐尧,蔡建华. “空天地”三位一体的山区铁路综合勘察技术体系及应用[J].北京测绘,2019,33(12):1479-1485.
- [43] 江玉涵,邹玉龙,郑宝玉.新一代超密集异构蜂窝无线网络研究[J].信号处理,2020,36(02):159-167.
- [44] 王元杰. 密集蜂窝网络中的频谱管理与性能分析研究[D].北京交通大学,2018.
- [45] 田飞燕,陈晓明,钟财军,张朝阳.6G 蜂窝物联网的大规模接入技术[J].物联网学报,2020,4(01):92-103.
- [46] 郭思滢. 基于轨道角动量的阵列天线研究[D].北京邮电大学,2019.
- [47] 郭天文. 无线通信系统中全双工技术研究[D].南京邮电大学,2019.
- [48] 黄欣荣. 改变未来世界的 6G 网络新技术 [J/OL]. 新疆师范大学学报 (哲学社会科学版):1-11[2020-04-12].<https://doi.org/10.14100/j.cnki.65-1039/g4.20191228.001>.
- [49] O'Shea T J , Hoydis J .An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications & Networking,2017,3(4):563-575.