

文章编号: 2095-4980(2018)06-0962-08

面向 5G 无线通信系统中若干物理层技术探讨

万菁晶¹, 陆怡琪², 田梦倩², 朱颖², 桂冠^{*2}

(1.四川移动通信有限责任公司 网络优化中心, 四川 成都 610000;
2.南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 各种智能设备的爆发式增加, 新兴多媒体应用的引入以及无线数据需求的指数增长已经对现有蜂窝网络造成了重大负担。与第四代(4G)长期演进(LTE)通信系统相比, 第五代(5G)无线通信系统容量要求达到 1 000 倍以上才能满足用户需求。从无线通信的物理层角度出发, 探讨几种应用在 5G 通信的潜在技术, 如新型信道模型估计、定向天线设计、波束成形算法和大规模多输入多输出(MIMO)技术。最后, 指出当前物理层技术存在的主要问题并探讨了 5G 通信系统中的可能发展方向。

关键词: 5G; 毫米波; 波束成形; 信道模型; 大规模多输入多输出

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.0962

On some physical layer technology in 5G wireless communication system

WAN Jingjing¹, LU Yiqi², TIAN Mengqian², ZHU Ying², GUI Guan^{*2}

(1.Network Optimization Center, Sichuan Mobile Communication Co. LTD., Chengdu Sichuan 610000, China; 2.College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: With the explosive growth of various smart devices and the introduction of new multimedia applications, the exponential growth of wireless data demand has caused a significant burden on the existing cellular network. Compared with the fourth-generation(4G) Long-Term Evolution(LTE) communication system, the capacity of the fifth generation(5G) wireless communication system requires more than 1 000 times to meet the user demand. From the perspective of the physical layer of wireless communication, some potential techniques applied in 5G communication are discussed, such as the new channel model estimation, design of directional antenna, beam forming algorithm and the technology of massive Multiple-Input Multiple-Output(MIMO). Finally, the main problems existing in physical layer technology and the possible development direction of 5G communication system are pointed out.

Keywords: 5G; millimeter wave; beamforming; channel model; massive Multiple-Input Multiple-Output

在过去几十年中, 世界已经见证了第一代移动无线通信, 即单纯的语音通信系统向第二、第三和第四代无线通信的演进^[1]。数字调制和频率复用技术的引入以及宽带码分多址(Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA)、正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)、多天线技术(MIMO)、混合自动重传请求(Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ)等物理层技术的快速发展, 大大推动了无线通信系统的发展。此外, 随着智能设备日益普及, 目前全网络之间互连的协议(Internet Protocol, IP)和第四代 LTE 通信已经成为人们日常生活不可或缺的一部分。因此, 一系列新的, 面向用户的移动多媒体应用, 如移动视频会议、流媒体视频、电子医疗和在线游戏开始出现。这些新应用不仅满足了用户要求, 而且为无线运营商开辟了新的商机。新兴移动互联网和物联网技术的快速发展, 网络设备和智能终端数量的持续增长, 使得网络流量需求呈指数规律增长。最近的无线通信统计数据显示, 2014 年全球移动通信增长了约 70%。其中占 26% 的智能手机占据了移动数据流量总额的 88%。实际上, 自 2012 年开始视频流量就超过了全球移动流量的一半以上。支持

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-03-12

基金项目: 江苏省“六大高峰”人才资助项目(XYDXX-010)

*通信作者: 桂冠 email:guiguan@njupt.edu.cn

大数据使用和各种终端设备的连接对目前 4G LTE 蜂窝系统中技术提出严峻挑战。LTE 蜂窝网络正在探索不同的研究和开发途径以提高容量和数据速率，如 MIMO、小型小区、协调多点(CoMP)传输和异构网络(HetNets)。然而，从长远看，也是不可能维持通信的持续性爆炸式增长^[2]。因此，重点是如何解决移动宽带通信中用户和通信容量呈指数上升的问题。

无线通信的容量取决于频谱效率和带宽，也与小区的尺寸有关。小区规模正在变得越来越小，物理层技术已经处于香农容量的极限。目前，几乎所有无线通信使用的频谱在 300 MHz 到 3 GHz 频段，通常称为“海滨谱”。在不同的无线电环境中，这个频带都可以可靠地传播数公里以上。要期望亚毫米波段能适应爆炸的移动通信和连接，似乎不太可能。因此，为提高无线通信容量，要面对高频带宽的新挑战。5G 无线网络的核心是探索 3~300 GHz 这个未使用的高频率毫米波频段^[3]。历史上，防冲撞雷达第一个采用毫米波频谱。美国联邦通信委员会(FCC)开放 59~64 GHz 和 81~86 GHz 频段分别用于无牌照无线和对等通信。

在过去几十年里，无线电天文学、雷达、机场通信和许多军事应用都已经使用了毫米波段。如图 1 所示，3~300 GHz 毫米波频谱中，只有 57~64 GHz, 164~200 GHz 这两个频段不太适合通信。即使使用非常少的毫米波频谱，其达到的数据速率和容量也是目前蜂窝频谱的数百倍^[4]。因此，大范围毫米波频谱的可用性为频谱受限的未来无线通信开辟了新的视野。新兴的毫米波频谱的引入、超连接的角度和新型专用系统要求将触发 5G 技术发展，增加无线数据速率、带宽、覆盖和连通，同时大大降低了往返延迟和能量损耗。根据用户需求，5G 通信技术应满足以下 8 项指标：a) 在实际通信网络数据速率可达到 1~10 Gbps，即需要达到 4G 网络理论峰值的 10 倍；b) 网络延迟 1 ms，比 4G 网络 10 ms 的往返时间几乎减少 10 倍；c) 单位面积内带宽高；d) 可同时接入大量物联网传感器设备；e) 感知可用性可达到 99.999%；f) 随时随地的连接要实现 100%覆盖；g) 能源消耗减少近 90%，实现真正的绿色 5G 通信；h) 电池使用寿命长。针对这 8 项技术指标要求，探讨 5G 通信系统中的物理层技术设计问题。

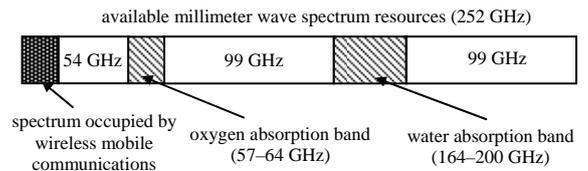


Fig.1 Millimeter wave band 3~300 GHz can provide rich spectrum resources to 252 GHz

图 1 毫米波段 3~300 GHz 可提供达 252 GHz 的丰富频谱资源

1 物理层设计问题探讨

要在现有的无线系统基础上构建 5G 体系架构，需要一个新方法使得这个过程变得顺利和快捷。因此，了解并整合物理层技术至关重要，以此达到最大性能和最小开销。在本节中，主要讨论已存在和即将到来的 5G 部署中的物理层技术。

1.1 毫米波无线信道

新兴的毫米波技术在移动无线通信方面带来了许多新的挑战^[2-3,5]。主要挑战是没有已有标准信道模型可以参考。对信道特性的技术理解也提出了新的结构技术、不同的多址接入和空中接口的新方法。此外，毫米波频率的生物安全性也有待考察。出于安全考虑，毫米波的非电离和热特性在文献[6]中有分析。从技术上讲，三星电子的 Faroo 等建议用传播损耗、信号穿透、多普勒和多径效应来表征无线信道。

1) 传播损耗：自由空间损失估计公式： $L_{FSL} = 32.4 + 20\log_{10} f + 20\log_{10} R$ ，其中， L_{FSL} 是毫米波主要传输损耗， R 代表发射机与接收器的距离， f 是载波频率。损耗在高频处更为突出。然而，这只适用于两个各向同性天线在特定的频率介入时的路径损耗。较短的波长可以在小范围内密集地封装较小的天线，从而对未来的 5G 网络使用各向同性天线具有挑战性。与自由空间损失相关的研究工作表明，对于相同的天线孔径面积，短波长(相比其他较长的波长)不应该有任何重大劣势。此外，毫米波链路能够产生非常窄的光束。例如，一个 70 GHz 的链路产生的光束比一个 18 GHz 的链路窄 4 倍。所以它在很多近距离的链路上得以应用。此外，最近的研究工作也表明，在蜂窝应用中，窄波束的定向传输减少了干扰并增强了空间复用能力。没有任何结论可以很好地支持大雨中毫米波性能会下降的理论。因此，毫米波链路被认为是完美的。然而，毫米波链路性能取决于许多其他因素，如节点之间的距离、无线电链路的边界和多径分集。

2) 穿透和视距(Line-Of-Sight, LOS)通信：在一个有效的系统设计中，最紧要的是要了解毫米波在不同环境中的传播过程。确定信号如何穿过或绕过寻常建筑物、植被和人类的传播，对于探寻室内室外环境下的传播特性很重要。理解毫米波在不同可能环境中的衍射、穿透、散射和反射将为 5G 网络部署奠定基础。

Rappaport 及其小组进行的信号中断的调查和对建筑材料反射系数的比较, 如有色玻璃、透明玻璃、石膏板、门、立方体和金属电梯, 揭示了常见的室外建筑材料对毫米波有高穿透阻力。此外, 室内环境的结构对信号也有显著的冲击衰减、多径分量和自由空间路径损耗, 如石膏板、白板、杂物和网状玻璃。RNRT 法国项目的 Sylvain Collonge 进行的传播测量指出了办公环境中高频波的传播特点。室内信道脉冲响应证实人体对毫米波传播会造成相当大的阻碍。人的移动会产生阴影效应, 这可以通过较大的天线波束宽度和引进角度分集来减轻。从已有的传播结果来看, 可以得出结论, 室外毫米波信号大多局限于户外, 只有很少的信号会透过玻璃门、打开的门和窗户进入室内。室内外的隔离需要不同的节点来服务不同的覆盖范围。这种隔离的特点有助于在特定区域内限制能量。此外, 室内外流量的分离降低了与无线电资源分配相关的管理费用, 并且降低发射功率。在宏的小型小区中通过灵活的聚类、高效的用戶选择和自适应反馈压缩可以进一步降低管理费用。有趣的是, 小型小区架构已经在密集的城市地区开始部署了。例如, 在日本城区, 基站(Base Station, BS)间距离仅 200 m 左右。因此, 在小型小区环境中的 LOS 传播的应用为毫米波通信带来了可能。保证 LOS 需要大规模的天线部署, 而且没有任何已经定义的模式作为参考。站点特定的随机部署预计会因情况而有所不同。

3) 多径和非视距传输: 在无线通信中, 多径是天线从不止一个路径接收信号的效果。据赫尔辛基理工大学 SMARAD 卓越中心的 Sylvain Ranvier 和 Mikko Kyro 介绍, 信道的多径特性可以通过选择延迟扩展作为验证参数被很好地描述。功率延迟谱的均方根有助于探索毫米波通信中的多径效应。对多径的理解可能会促进非视距(Non-Line Of Sight, NLOS)问题的解决。LOS 链路在动态变化的户外环境中不可能始终合适。因此, 探索 LOS 和 NLOS 部分阻碍的可能性非常重要。文献[7]中测量得到平均雨致衰减、雨中的短期信号水平、通过植被和玻璃的衰减以及宽带功率延迟分布。相比干净干燥的天气条件, 在雨中会检测到更多的多径分量。在不同的指向角, 大量的多径分量可用于链路改善。建筑角落、边缘和人类活动可能不会完全衰减 LOS 链路, 这些往往造成阴影。人们也观察到, 波束宽度宽的天线, 给出了接收信号的准确估计。另一方面, 窄波束宽度的天线具有空间指向性方面的优势。波束展宽技术的合理组合探究了在小区域中变化特性的优势。此外, 天线角度的最佳组合也使系统具有较高的信噪比和低延迟扩展。在非视距路径的通信需要均衡器, 这带来高延迟、增加功耗和低数据速率的新问题。多径统计有助于设计均衡器和选择调制技术。以往和当前的信道统计的适当组合有助于解决大多 NLOS 传播面临的问题。文献[8]中提出的延迟域信道模型使用了来自任意位置的散射点的反射信号。

4) 多普勒效应: 载波频率和移动性描述了多普勒效应。接收的入射波有不同的偏移值, 从而导致多普勒扩展。多普勒效应产生的时间选择性衰落通过选择数据包大小和信道的相干时间上合适的编码很容易得到缓解。此外, 毫米波传播固有的窄波束传输中的角传播减小, 进一步降低了多普勒传播^[9-10]。因此, 多普勒效应不大可能在 5G 网络中引起任何重大挑战。

1.2 自适应波束形成

如前所述, 智能天线的设计是有效的毫米波通信的关键。此外, 定向波束也是新兴 5G 网络不可或缺。智能天线是使一定的最优准则下产生的最佳波束的主瓣对准目标用户, 随着无线信道的变化或目标的移动, 智能天线的权值作自适应调整, 调整权值的最优算法称为自适应波束形成算法, 是智能天线研究的核心。在本节中, 将讨论如何使用智能天线设计创建、控制、训练、引导和测量波束。

1) 创建和控制波束: 要将能量集中在所需的方向, 了解毫米波波束形成算法是必不可少的。不同的天线阵列和子阵列的配置, 搭配指定的波束赋形权重, 可以引导和控制波束。模拟、数字或射频前端可以进行波束形成。将波束赋形权应用于数字或模拟域以产生定向波束。图 2 是模拟、数字和混合域的波束形成。数字波束形成中, 在发射机或接收机分别进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)前后, 在调制的基带信号上, 在每条射频链路上与系数相乘。而模拟波束形成则是在时域上对修正后的射频信号施加系数。数字波束形成提供了更好的性能, 然而同时也增加了复杂性和成本。

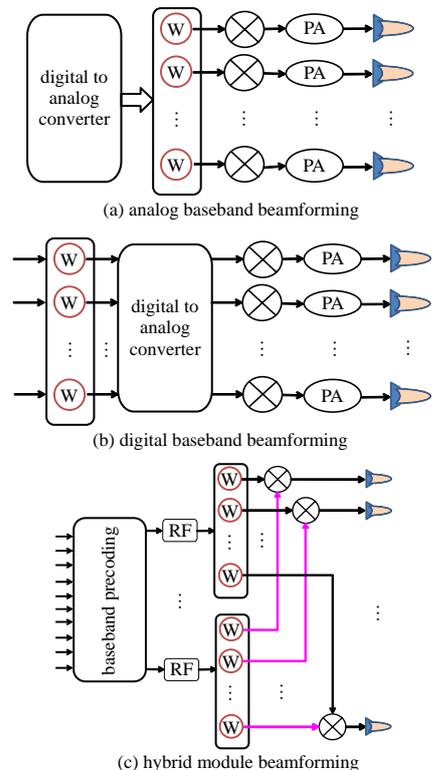


Fig.2 Digital, analog and hybrid module beamforming schemes

图2 数字、模拟以及混合模数波束成型方案

模拟波束形成则是一个简单有效的方法，但具有较小的灵活性。混合波束形成结构用模拟域的移相器和数字域的灵活性提供尖波束。对于大的天线阵列，每个天线单元使用的单独收发器都是昂贵和复杂的。它不仅会导致元件成本上升，而且还增加功耗。来自诺基亚解决方案和网络的 Frederick 及其团队建议 5G 通信系统采用 MIMO、射频和混合波束形成的体系结构来解决这样一些挑战。

对于毫米波频率，RF 组件的效率通常很差，因此要使功率放大器一直工作在最大功率。对阵列的控制通过移相器完成。也有一个提议，提出使用窄波束传输数据并使用更宽的波束用于控制信道。三星电子的 Dallas 技术实验室提出通过把天线阵列分裂成多个逻辑子阵列而不增加天线间距的波束展宽技术。传统的波束形成方案聚焦于最大比结合，也就是所需的信号最大化和干扰迫零(干扰无效)。文献[11]中的工作为虚拟蜂窝网络中求和率的最大化提供了一种新的波束形成算法。该解决方案实现了期望信号最大化和干扰最小化之间的平衡。

2) 天线训练协议：可控的和高度定向的天线带来的波束成型对未来的 5G 发展意义重大，但也给复杂的通信协议设计带来重大的新挑战。用户与发射器波束对准，同时发送与接收天线之间的通信是不可能的，因为相应的波束不是不对准的就是衰减的。因此波束形成训练协议非常关键，它用来发现最佳波束方向对。可控波束可用于射频通信中的手机和基站，还可用于回程协调。早期，在毫米波天线指向协议中使用了伪噪声序列。结合窄带导频信号和多径角度扩展，可以有效地确定天线指向方向。文献[12]提出奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法，这种方法基于发送预编码和接收组合，被用于求多级迭代方式下的训练天线系数。对于射频链数目少、天线数目大的系统，这种训练方法非常有效，它降低了毫米波通信的计算复杂度。斯坦福大学的研究人员强调了波束误差的识别，以有效处理波束形成结构。波束编码是一种波束训练技术，它给波的每个角度都分配一个独特的签名码。在训练包中同时编码多波束角，有助于最佳角度对的快速估计。此外，该技术显示在非视距环境下的鲁棒性，对未来毫米波通信很关键，但网络必须确保移动设备在天线的波束内。应用于定向卫星通信的天线跟踪系统非常有用，这个概念是基于通过小幅地移动轴获得高接收信号这个基础，精确度和性能取决于步长和信噪比。

3) 到达角(Angle Of Arrival, AOA)估计：对于户外移动信道，有必要了解 AOA 的时变和多普勒扩展特性。相比 LOS, NLOS 场景中天线的定向会产生更高的路径损耗和多径时延扩展。用于窄波束可控天线的自适应波束阵列显示，在非视距天线中，可以通过照亮周围物体来创建链路。针对接收机和发射机绘制所有链路的方位角组合。实验结果指出，在基站发射机应指向接收方向，光束转向至多 60°。在寻找 NLOS 场景下的迂回路由时也会用到 AOA 知识。如果有堵塞，设备需要切换到相邻可用的迂回路径。传统方法是通过对所有训练光束对进行信号强度排名来确定迂回路径。文献[13]中，斯坦福大学的作者提出利用到达角值来进行备用路径识别，该概念类似于多用户检测中的连续干扰消除方案，其主要优点为低估计误差。为了实现较低的冗余度，节约能源和带宽，AOA 信息也被用于定向自追踪协议。定向天线和最短路径按需路由，可以提高无线广播的效率和可靠性。为了知道典型的 5G 基站位置，在高架发射机和接收机的各种配置下，进行了分组数据协议(Packet Data Protocol, PDP)拓展和传播损耗的 AOA 测量。

1.3 扇形天线

天线数量越来越多，很难在毫米波 MIMO 系统中获得每个天线单元的信道信息。为满足链路预算的不足，毫米波 MIMO 系统受到射频波束形成要求的约束。使用变换发射器和接收器的窄波束可以解决这个问题。数据传输通过选择最佳的发射接、收束对实现。切换波束系统采用固定天线模式，用于从特定方向发射或接收。一个扇区的天线模型被认为非常适用于这个系统。可以构造多个天线以覆盖一个固定的扇形区域。创建扇区的这些天线在一定方位角的有限范围内可以提供高增益。每个发送节点的范围被划分成部分重叠的扇区。对于传输或接收，节点被配置为在一个或多个扇区上切换。共同覆盖传输范围通常比全向模式更有效。同时，也减少了硬件要求。波束组合协议和空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)可以与频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)技术一起使用，以提高频谱的容量和频率复用率。

1.4 大规模 MIMO 系统

4G 系统中，基站配置的天线数较少，MIMO 性能增益也受到极大限制。为了克服传统 MIMO 技术中的不足，美国贝尔实验室的 Marzetta 于 2010 年提出了大规模 MIMO 的概念。在大规模 MIMO 系统中，基站配置数十至数百个天线。使用简单的、线性的信号处理技术，大规模 MIMO 给基站提供了数量庞大的天线^[14-16]。MIMO 技术能够提高无线信号传输的空间自由度，从而提高无线接入网络的频谱效率与信道容量。

图 3 是一个使用大规模 MIMO 的基站。天线网格能够引导水平和垂直波束,大规模 MIMO 能显著增强频谱效率和能源效率,每一个天线都为实现定向传输而安置。波阵面相干叠加是大规模 MIMO 技术的基本原理,发出的波阵面在预定位置加强了信号,在其它位置减弱了强度。因此,大规模 MIMO 空间复用使基站容量增加了几个数量级。这样的设计需要有针对大规模 MIMO 系统模型的有效算法,以及调制技术的改进。天线数目的增加不能让高度相关的信道向量转变为正交。因此,文献[14]认为用户调度算法应该是大规模 MIMO 系统的关键。时分双工(Time Division Duplexing, TDD)是大规模 MIMO 系统的首选,这样可以避免与信道估计和频分双工(Frequency Division Duplex, FDD)中信道共享有关的复杂性。频率校正算法方面进行的研究,如基于频率校正的到达方向,协方差矩阵和时空相关性,使大规模 MIMO 系统可以使用 FDD。研究人员通常提出在大规模 MIMO 系统中使用二维网格配置和部署天线阵列。然而,三维配置和分布式阵列结构也呈现良好的备选特性,这需要进一步研究。文献[17]中为未来基站设计提出了大规模 MIMO 部署方案,包括分布式天线阵列和定向天线阵列。廉价和低功耗的组件可用于构建大规模 MIMO。与为大规模 MIMO 系统而设计的大量基站天线相关的,与不同小区协调的信道状态信息,会导致大量信息交换的开销。由于回程链路容量有限,阻碍了系统性能。文献[18]探索了用大规模 MIMO 在蜂窝网络中实现多播。为了达到更好的能量集中,减少空间干扰,文献[19]提出了通过集成电磁透镜与大型天线阵列这样的新的大规模 MIMO 设计。文献[20]进行了小小区网络(Small Cell Network, SCN)和大规模 MIMO 之间的比较,SCN 的能量效率大于大规模 MIMO。缩小天线阵列尺寸和相关的电子电路使小小区,在低频毫米波传输时,适合大规模 MIMO。因此,这两种技术的有效组合预计将会提供更好的结果。此外,大规模 MIMO 的空间和时间自由度可以帮助管理剩余的自我干扰。因此,工作在快衰落信道中利用 MIMO 无线电^[21],结合不完善的信道估计,实现全双工速率。

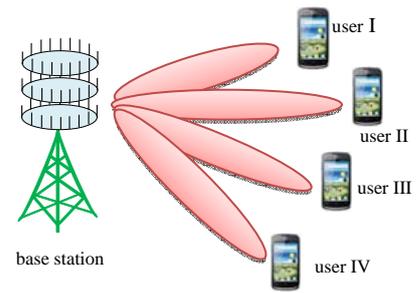


Fig.3 Massive MIMO and beamforming
图 3 大规模 MIMO 以及波束成型

1.5 全双工无线电技术

在同一频率信道同时进行接收和传送,即全双工(Full Duplex, FD),点对点无线链路频谱达到双倍效率。发射机和接收机之间的串扰、路径损耗、衰落和内部干扰,阻碍了在同频信道中 FD 的普及。近期在射频和波束形成天线设计技术研究,改进了同一频段 FD 传输。MIMO 技术的进展提出了在空间域减少自干扰的有效方法,使尽管有干扰,也能成功进行 FD 中继。FD 提供双倍的容量,改善反馈和延迟机制,同时保持在物理层的安全,并消除了基于竞争的网络中的隐藏节点问题。在同一资源块上同时进行上行链路和下行链路的调度,导致每一个 FD 传输都要遭受来自小区内的自干扰和相邻小区的自干扰。因此,在实施全双工时,减少自我干扰(Self-Interference, SI)是要解决的主要挑战。被动 SI 消除利用定向天线、吸收屏蔽和交叉极化来隔离发射器和接收机;主动技术利用节点传输信号的信息消除干扰。具有波束形成技术、大规模 MIMO 部署、集中式架构和 SCN 的设计的 5G 网络有利于 FD 的实现。结合合适的速率和功率分配,智能设备的调度可以从 FD 操作中实现高容量增益。因此,进化和变革的物理层技术将在未来的 5G 无线通信产生深远影响。

2 物理层技术的开放问题和挑战

5G 技术革命将对未来的无线通信产生深远的影响。相比现有的 3G/4G 蜂窝系统,下一代 5G 无线有显著不同的特点,更严格的性能要求和服务质量(Quality of Service, QoS)要求。5G 承诺超高的数据率、极低的时延,随时随地的覆盖,巨大的节能,同时带来相应的挑战。以下提到 5G 无线通信带来的关键研究问题:

1) 毫米波频谱: 5G 将引入毫米波频谱(3~300 GHz)。相比目前高价值频谱(beach-front spectrum),毫米波的传播特性对无线通信有些不利,但其巨大的带宽,为满足巨大的容量需求提供了一个值得关注的长期解决方案。因此,第一个挑战是分析毫米波背后的物理现象,如大气吸收、绕射、传播、多普勒、散射、折射、反射、多径和衰减。大气传播过程中,毫米波主要被氧气和水蒸气吸收,另外雨水衰减对其影响也十分严重。

2) 流行的信道模式不可用: 5G 毫米波移动通信的发展需要对无线电信道有基本的认识。研究人员正在研究室外、室内和固定毫米波通信信道模型。还有一个迫切需要,就是要深入研究户外环境中的毫米波通道,以感知路径损耗、角度扩展、时延扩展、NLOS 波束成形和阻塞问题的影响^[22]。信道模型的深入分析才能为空中接口和多址接入的新方法奠定基础。

3) 站点的特定传播：毫米波的传播严重依赖于环境以及接收器和发射器的位置。因此，站点特定小区的设计是 5G 部署的一个关键。由于这个问题在传统的蜂窝系统中没有太多的研究，因此需要进一步研究。

4) 天线阵列设计：毫米波频率较小的波长，允许在一个相对较小的物理表面放置一个具有数百个天线元件的阵列。大型天线阵列能够引导和聚合光束能量，因此，定向窄波束通信成为研究重点之一，它改变了“小区”的全部概念。为获得期望的方向性，在 BS 和移动设备的架构设计方面都面临着诸多挑战。

5) 波束成形和波束训练：定向波束由控制波束成形的权值形成，取决于波束成形的架构。为促进波束成形技术，实时基带调制解调器、毫米波射频电路及相关软件的设计是研究的热点领域。需要适当的波束选择，以确保选定波束之间的对准。需要设计和分析波束形成训练协议。此外，需要解决隐藏终端问题，以及定向传输中固有的周边位置探测问题。

6) 大规模 MIMO：另一个严峻的挑战是实现大规模 MIMO。它需要一个完全不同的基站结构与大量的由低功率放大器驱动的微小天线。通过在 5G 实现中采用有效的大规模 MIMO 算法可以使未来通信实现一大飞跃。理论上的进一步研究、仿真和试验台实验都非常重要。

7) 新型复用：理想的空分波束模式容易实现空分多址(SDMA)。SDMA 可减少干扰和抑制多径干扰，对 SCN 部署和 NLOS 通信至关重要。为实现 5G 网络的低延迟，还需要进一步研究稀疏码多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)、交织分多址接入(Interleave Division Multiple Access, IDMA)、滤波器组多载波(Filter Bank Multi-Carrier, FBMC)和广义频分复用(Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM)。

8) 非正交性：异构连接、致密化、新兴应用(机器对机器通信、物联网、车联网、金融科技、健康监测、智能电网等)将使同步和正交的僵化范式成为未来移动场景的一个巨大挑战。在非正交性和异步性领域的研究工作将有助于实现 5G 网络的低时延要求。

9) 网络密集化：网络密集化是小小小区异构架构 5G 的关键特征，基站密度非常高。理解干扰的快速协调和消除、软件定义网络(Software Defined Network, SDN)、认知无线网络、自组织网络(Self-Organized Network, SON)，可以实现对密集网络的管理。这些对 5G 是有前途的技术，但在 5G 下的部署还有待探讨。

10) 向后兼容性：对整个 5G 结构要求有很大的讨论空间。随着 LTE 的大规模部署，5G 架构提供向后兼容性是非常有益和重要的。随着独立 5G 系统的发展，研究人员正在探索 5G 与现有 4G/3G 网络兼容的可行性。

11) C-RAN 和 H-CRAN：C-RAN 为密集 5G 部署提供成本效益和高效节能的解决方案。很少有研究说明 C-RAN 对 5G 的贡献。此外，许多研究人员正在研究异构网络和 C-RAN 的结合，即 H-CRAN。要结合 C-RAN 和 H-CRAN 的优势设计 5G 网络将更具挑战性。

12) 低延迟和 QoE：5G 要求往返延迟是 1 ms。然而，很少有研究说明实现这一严格要求的方法。低延迟对实现高 QoE 也是至关重要的。由于 QoE 具有主观性，给这方面的研究也带来了一些挑战。

13) 能源效率：成本和能耗是 5G 的主要考虑因素。在高 BS 密度和更宽带宽情况下，需要考虑电力和通信开销。对新 5G 概念，能源效率仍有很大空间。C-RAN 及节能技术有助于改善性能，研究能量感知 5G 模型，可以成功实现节能。可再生能源供电的绿色基站是有益的，但这涉及到新的研究挑战。

14) 5G 应用：5G 带来大量新应用，新物联网将有数十亿的连接设备，给连接和配置带来前所未有的挑战。以前大多应用独立，而如今研究人员正在进一步探讨主要在 5G 应用中的各种组合。

15) 标准化：多个论坛和项目一直致力于为 5G 提供愿景结构。5G 标准化尚未正式启动，但已有商定的时间表。

16) 深度学习给 5G 通信带来技术革命：在物理层，人工智能中的深度学习算法可能使 5G 通信系统中的信号处理发生根本性改变^[23-27]，如果将深度学习引用到 5G 通信将是一个非常重要的课题。

3 未来可能存在的研究课题

5G 通信研究工作的详细调查显示，毫米波频谱具有提供高容量需求解决方案的巨大潜力。研究毫米波背后的物理现象将进一步扩大知识库。从 3 GHz 到 300 GHz 的频谱很大，可能本身就有很多变化。深入了解频谱特性不仅有助于更好的网络设计，而且能实现有效的频谱分配，它还有助于创建有效的信道模型。许多研究工作都集中于研究毫米波无线信道的行为，不同现实环境中的现场试验、建模、仿真和推理论证有助于信道提取。

5G 的关键，如网络致密化和以用户为中心的要求，将使网络结构、管理和控制方面逐步产生巨大的转变。大规模波束转向天线阵列被视为 5G 网络设计的关键，有效的基站波束形成设计、有效的波束训练协议、准确的权重计算和可靠的错误校正有助于实现智能天线的设计。通过发展 C-RAN, HetNets, H-CRAN, SDN, 大规模

MIMO 和 SON, 可以缓解密集网络设计和管理的挑战。在设计 5G 网络时, 这些技术将被整合。支持定向 MAC 协议有利于提高空间复用和解决 LOS 误差。5G 提供了巨大的频谱, 可以引入新的应用, 迫切需要部署有需要的新应用。

提高能源效率的研究仍然是巨大的挑战。相信对于可持续的 5G 网络, 人们还会有很大的讨论空间。随着无数基站和极多的连接, 5G 中的问题变得更为严重。可喜的是出现了可再生能源为动力的绿色基站。用任何单一技术同时满足所有要求几乎不可能, 5G 成功的商业推出, 需要学术界和行业之间进行大量合作^[28-31]。

4 结论

无线连接的快速渗透、几乎呈指数增长的无线数据(多媒体视频)使用和功能丰富的智能设备的普及, 正在逐步为下一代主要蜂窝演进迈向 5G 创造条件。下一代 5G 无线系统已经有望在数据速率、连接性和 QoS 方面大幅增加。大量的新兴应用, 如物联网、智能电网和车联网有望在 5G 系统中得到支持。本文综合论述了蜂窝向 5G 网络的演变。首先指出与无线电网络布局, 空中接口, 智能天线, 云和异构 RAN 的设计相关的新架构范式转变。随后, 详细介绍了底层物理层技术, 包括对新的物理信道的了解、LOS/NLOS 下信道模型的估计、新型天线设计、波束形成和大规模 MIMO。接下来, 讨论了主要的 MAC 层协议和复用方案, 如 SDMA, IDMA 和现有 OFDM 的演化, 以有效支持新的物理层特性。新的新兴应用, 如 D2D 和 M2M 通信、物联网、车载通信和医疗应用成为 5G 背后的主要驱动力。提到了这些关键应用的细节, 以了解它们与蜂窝变革之间的影响。由于 5G 将提供更好的用户体验, 强调与 5G 网络变革相关的、新的 QoS, QoE 和 SON。5G 大规模推出的一个主要问题在于越来越多的能源消耗、相应的温室气体排放和运营成本, 这促使人们对能量感知基站, 高效节能的回程和成本效率做出综述。为了表述 5G 实施的现状, 也介绍了在 5G 领域的主要实地测试、驱动测试和仿真。最后, 指出主要存在的研究挑战, 并确定了未来可能的研究方向。

参考文献:

- [1] RAYCHAUDHURI D,MANDAYAM N B. Frontiers of wireless and mobile communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2012,100(4):824-840.
- [2] RAPPAPORT T S,XING Y,MACCARTNEY G R,et al. Overview of millimeter wave communications for the fifth-Generation(5G) wireless networks—with a focus on propagation models[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017,65(12):6213-6230.
- [3] MUMTAZ S,RODRIGUEZ J,DAI L. mmWave massive MIMO:a paradigm for 5G[M]. [S.l.]:Academic Press, 2016.
- [4] ODELU V,DAS A K,KHAN M K,et al. Expressive CP-ABE scheme for mobile devices in IoT satisfying constant-size keys and ciphertxts[J]. IEEE Access, 2017(5):3273-3283.
- [5] ZHANG J,LIU G,ZHANG F,et al. Advanced international communications[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2011, 6(2):92-100.
- [6] WU T,RAPPAPORT T S,COLLINS C M. Safe for generations to come[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015,16(2):65-84.
- [7] XU H,RAPPAPORT T S,BOYLE R J,et al. Measurements and models for 38-GHz point-to-multipoint radiowave propagation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,18(3):310-321.
- [8] KYRO M,KOLMONEN V M,VAINIKAINEN P. Experimental propagation channel characterization of mm-wave radio links in urban scenarios[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2012,11(2):865-868.
- [9] KHAN F,PI Z,RAJAGOPAL S. Millimeter-wave mobile broadband with large scale spatial processing for 5G mobile communication[C]// 2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello,IL, USA:IEEE, 2013:1517-1523.
- [10] PI Z,KHAN F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6):101-107.
- [11] KIM J,LEE H W,CHONG S. Virtual cell beamforming in cooperative networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014,32(6):1126-1138.
- [12] XIA P,YONG S K,OH J,et al. Multi-stage iterative antenna training for millimeter wave communications[C]// IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans,LO,USA:IEEE, 2008:1-6.
- [13] TSANG Y M,POON A S Y. Successive AoA estimation: revealing the second path for 60 GHz communication system[C]// Communication,Control,and Computing. Monticello,IL,USA:IEEE, 2011:508-515.

- [14] LU L,LI G Y,SWINDLEHURST A L,et al. An overview of massive MIMO:benefits and challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014,8(5):742-758.
- [15] GAO X,EDFORS O,RUSEK F,et al. Massive MIMO in real propagation environments[J]. Eprint Arxiv, 2014,14(7):1-10.
- [16] GUI G,LIU N,XU L,et al. Low-complexity large-scale multiple-input multiple-output channel estimation using affine combination of sparse least mean square filters[J]. IET Communications, 2015,9(17):2168-2175.
- [17] MEHMOOD Y,AFZAL W,AHMAD F,et al. Large scaled multi-user MIMO system so called massive MIMO systems for future wireless communication networks[C]// International Conference on Automation and Computing. London,UK:IEEE, 2013:1-4.
- [18] XIANG Z,TAO M,WANG X. Massive MIMO multicasting in noncooperative cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014,32(6):1180-1193.
- [19] ZENG Y,ZHANG R,CHEN Z N. Electromagnetic lens-focusing antenna enabled massive MIMO:performance improvement and cost reduction[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014,32(6):1194-1206.
- [20] LIU W,HAN S,YANG C,et al. Massive MIMO or small cell network: who is more energy efficient?[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. Shanghai,China:IEEE, 2013:24-29.
- [21] WANG S,LIU Y,ZHANG H. Self-interference cancellation of full-duplex massive MIMO relay systems over Rician fading channels[C]// IEEE 85th Vehicular Technology Conference. Sydney,NSW,Australia:IEEE, 2017:1-6.
- [22] RAJAGOPAL S,ABU-SURRA S,PI Z,et al. Antenna array design for multi-Gbps mmwave mobile broadband communication[C]// IEEE Global Telecommunications Conference. Kathmandu,Nepal:IEEE, 2011:1-6.
- [23] O'SHEA T,HOYDIS J. An introduction to deep learning for the physical layer[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications & Networking, 2017,3(4):563-575.
- [24] KATO N,FADLULLAH Z M,MAO B,et al. The deep learning vision for heterogeneous network traffic control: proposal, challenges, and future perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2016,24(3):146-153.
- [25] BORGERDING M,SCHNITER P,RANGAN S. AMP-inspired deep networks for sparse linear inverse problems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017,65(16):4293-4308.
- [26] MAO B,FADLULLAH Z M,TANG F,et al. Routing or computing? The paradigm shift towards intelligent computer network packet transmission based on deep learning[J]. IEEE Transactions on Computers, 2017,66(11):1946-1960.
- [27] KAMILOV U S,MANSOUR H. Learning optimal nonlinearities for iterative thresholding algorithms[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016,23(5):747-751.
- [28] 何世文,黄永明,王海明,等. 毫米波无线通信发展趋势及技术挑战[J]. 电信科学, 2017(6):11-20. (HE Shiwen,HUANG Yongming,WANG Haiming,et al. The development trend and technical challenge of millimeter wave wireless communication[J]. Telecommunications Science, 2017(6):11-20.)
- [29] 张中山,王兴张,成勇,等. 大规模 MIMO 关键技术及应用[J]. 中国科学:信息科学, 2015,45(9):1095-1110. (ZHANG Zhongshan,WANG Xingzhang,CHENG Yong,et al. Key technology and application of large scale MIMO[J]. Science China: Information Sciences, 2015,45(9):1095-1110.)
- [30] 王亚军,张艳. 智能天线的本质技术及其智能实现[J]. 中国新通信, 2016(20):76-77. (WANG Yajun,ZHANG Yan. Essential technology and intelligent realization of smart antenna[J]. China New Telecommunications, 2016(20):76-77.)
- [31] 张雷,代红. 面向 5G 的大规模 MIMO 技术综述[J]. 电讯技术, 2017,57(5):608-614. (ZHANG Lei,DAI Hong. An overview of massive MIMO for 5G wireless systems[J]. Telecommunication Engineering, 2017,57(5):608-614.)

作者简介:



万菁晶(1974-),女,成都市人,硕士,四川移动网络优化中心总经理,主要研究方向为 5G 通信.email:121623036@qq.com.

陆怡琪(1993-),女,江苏省扬州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为毫米波通信中混合预编码技术.

田梦倩(1993-),女,南京市人,在读硕士研究生,主要研究方向为大数据分析.

桂冠(1982-),男,安徽省枞阳县人,博士,教授,主要研究方向为无线通信与压缩感知技术.

朱颖(1994-),女,江苏省淮安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为大数据分析.