



专题: 5G

毫米波无线通信发展趋势及技术挑战

何世文, 黄永明, 王海明, 洪伟

(东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 未来无线通信系统面临传统频谱资源短缺与无线业务需求爆炸性增长的瓶颈问题, 拥有丰富可用频谱资源的毫米波通信成为下一代无线宽带蜂窝通信的有效选择。然而, 传输路径损耗大、氧气及水分子吸收严重等特性给毫米波通信带来了极大挑战, 需寻求不同于低频段无线通信的技术途径。在分析毫米波传输特性后, 对毫米波通信技术研究进展、射频前端进行了比较全面的分析, 并比较深刻地剖析了毫米波通信的技术挑战, 同时提出相应的研究方向。

关键词: 毫米波通信; 数模混合架构; 大规模多输入多输出; 多用户发送; 高性能处理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017202

Development trend and technological challenges of millimeter-wave wireless communication

HE Shiwen, HUANG Yongming, WANG Haiming, HONG Wei

School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: Facing the bottleneck problem of the scarcity of the traditional spectrum resource and the demand of wireless business that increases explosively, millimeter-wave (mmWave) communication with rich available spectrum resources become a promising way for the next generation broadband wireless cellular communication. However, the features of the large propagation path loss and severe oxygen and water molecules absorb of mmWave bring great challenge to the mmWave communication technology research. After analyzing the propagation properties of mmWave communication, a comprehensive analysis and summary of the research progress and radio front end were given out. Challenges of mmWave communication were profoundly analyzed and the corresponding research direction was put forward.

Key words: millimeter-wave communication, digital-analog hybrid architecture, massive multiple-input multiple-output, multi-user transmission, high performance processing

1 引言

随着电子信息技术的飞速发展, 特别是无线通信技术的发展及 4G 无线通信技术的普及, 在短

短的 10 年间, 无线网络处理的 IP 数据量已经超过了 100 倍: 从 2010 年不到 3 EB (Exabyte, 艾字节) 到 2018 年的 190 EB, 甚至有望在 2020 年超过 500 EB。迄今为止, 视频数据处理是无线网

收稿日期: 2017-05-16; 修回日期: 2017-06-12



络数据处理增长的主要因素^[1]。伴随个人通信技术发展的新兴移动互联网和物联网技术也突飞猛进，网络设备和智能终端的数量持续增长，通信业务需求越来越高，致使网络流量需求呈指数规律增长。

为了满足未来数年内通信流量增长数千倍的发展需求，工业界和学术界的无线通信技术研究人員正如火如荼地进行着 5G 移动通信关键技术研究。5G 移动通信关键技术主要体现在无线传输技术和网络技术两方面，前者主要包括大规模天线阵列、超密集组网、新型多址和全频谱接入等技术，后者主要有自组织网络（SON）、软定义网络（SDN）和网络功能虚拟化（VNF）等^[2-4]。5G 移动通信技术的主要发展目标是与其他无线移动通信技术密切链接，为移动互联网的快速发展提供无所不在的基础性业务能力，主要从 3 个方面开展研究与探索：首先通过引入新型无线传输技术将资源利用率在 4G 的基础上提高 10 倍以上；其次通过引入新型体系结构（如超密集组网、控制面与数据面分离等）和更加深度的智能化能力将整个系统的吞吐率提高 25 倍左右；最后进一步挖掘新型频率资源（毫米波、可见光和激光通信等），使移动通信频率资源扩展 4 倍左右^[5]。

根据香农定理可知：扩大信道容量最直接有效的方法是增加系统带宽。目前用于移动通信的微波频段带宽只有 600 MHz，而 2020 年 5G 移动通信需要大约 1 GHz 的带宽^[5]，因此人们需要挖掘新的频谱资源来满足未来 10 年移动互联网流量增长 1 000 倍的发展需求。利用毫米波频段的潜在大带宽（30~300 GHz）来提供更高的数据速率被视为未来无线通信技术潜在发展趋势^[6]。虽然，丰富频谱资源的毫米波可实现高速率无线传输，但是在实现毫米波蜂窝网络通信过程中遇到不少技术挑战^[7]。

- 范围和定向通信：根据 Friis（费里斯）的传播规律可知，自由空间全向路径的损耗

与频率的二次方成正比^[8]。因此，毫米波通信系统需要采用大规模阵列天线通信技术（如波束成形和定向传输）来弥补毫米波传播路径损耗。

- 阴影和快速的信道波动：阴影影响会导致中断或者毫米波传播信道质量不佳。对于给定的移动速度，信道相干时间与载波频率的线性关系意味着在毫米波的信道相干时间非常小，比如对于 60 km/h 移动速度来说，在 60 GHz 上的多普勒扩展大约是 3 kHz，也就是毫米波信道呈毫秒级变化特性，因此如何快速跟踪毫米波信道变化是毫米波通信的重要难题^[7,8]。
- 多用户协调：毫米波通信研究与应用主要集中于点对点链路（比如蜂窝回传）或限制用户数量的局域网和个域网以及禁止多用户传输的 MAC 协议^[9-13]。对于高频谱效率的空间复用来说，人们需要研究新机制来协调实现毫米波空间复用传输机制。
- 功率消耗：功率消耗与采样率呈线性，而与采样比特数呈指数关系^[14-16]。对于低功耗、低成本设备来说，在宽带宽和大规模天线上实现高分辨率量化并不现实，特别是在高清视频传输方面，毫米波通信面临着更严峻的技术挑战。

人们研究无线通信系统的基础是电磁波空中传输特性，即物理信道模型。为了深入了解毫米波空中传播衰落特性，人们需要大量实际信道测量数据来分析了解电磁波传播特性，进而验证信道模型准确性。在中心频点为 2.6 GHz 和带宽为 50 MHz 的住宅区，通过使用 128 个圆柱形贴片阵列进行了大规模 MIMO 信道的测试^[9]，基于虚拟均匀线性阵列和实际的均匀圆柱阵列对室外进行了大规模 MIMO 信道测量^[10,11]。在中心频点为 2.6 GHz、带宽为 20 MHz 的环境中，使用了多达 112 个元

件组成的可扩展虚拟天线阵列进行了室外信道测量^[12]。为了解除受到 2.6 GHz 的单载波频率约束,通过使用可转向波束天线,在 28 GHz 进行了室外毫米波信道的测量^[13-15]。通过使用 7×7 的虚拟面阵波束阵列天线结构,研究者测量了 60 GHz 室内毫米波信道^[16]。测量分析结果表明受毫米波波长短的影响,毫米波传播路径损失非常严重。而且,信道测量目前主要集中于 SISO/MIMO 信道,如何测量大规模毫米波天线阵列的信道特性仍是一个严峻的问题。

为了弥补毫米波传播路径损耗大的特性,大规模相控阵列天线技术自然而然地被用于毫米波通信系统,有望在实现毫米波通信广域覆盖的同时利用带宽优势提升传输速率^[17-19]。虽然在毫米波频段具有丰富的可用频谱资源,但仅通过增大信道带宽提升的传输速率空间有限,而且带宽增加也进一步增加信号处理及器件的实现复杂度。在不增加信号带宽及功率消耗的条件下增加无线通信传输速率和可靠性的 MIMO 技术成为进一步提升毫米波传输速率的关键技术。最近,人们正在研究一种新型的数模混合天线架构体系,即基带采用低维度的传统数字域预编码来实现空间复用,而射频域采用相移器来实现模拟预编码弥补毫米波传播的路径损耗,进而实现广域覆盖范围的高速率无线传输目标。

相比于传统 MIMO 预编码技术,数模混合预编码可以有效通过配备比发送天线数更少的射频链路获得与全数字预编码相近的系统性能,同时保证毫米波通信的传播覆盖范围。为了探究毫米波通信系统在已知信道状态信息完全已知条件下的数模混合通信系统性能,人们从不同角度研究了几种相对简单的数模混合预编码方案。然而,在毫米波通信系统获取精准的信道状态信息是极其困难与复杂的工作,进而研究低复杂度且易于实现的数模混合预编码自然而然地受到人们的关注。基于码本设计模拟域波束向量,可以有效地

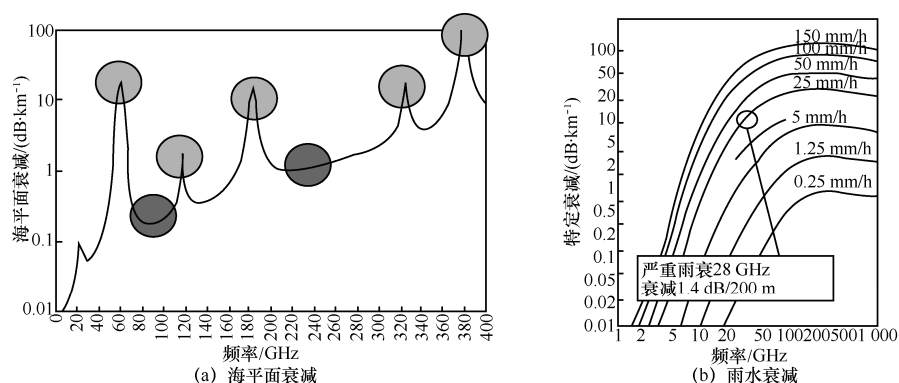
实现在降低信道状态信息获取难度的同时保持一定的理论性能^[20-28]。系统带宽为低频段通信系统的数十倍的毫米波通信也面临着信道频选性问题,因此,如何有效研究大带宽条件下毫米波通信系统的数模混合预编码问题成为广大研究者所关注与探讨的问题^[29,30]。

为了有效解决未来无线通信系统的低时延、高可靠性、超高速无线传输需求,拥有丰富频谱资源的毫米波通信被视为提升未来无线通信系统容量及传输速率的有效选择。本文全面地概括毫米波通信技术最新进展及分析毫米波通信面临的技术挑战。

2 毫米波传播特性

随着(个人)移动通信技术的高速发展和各种移动多媒体终端设备的广泛应用,低频段(300 kHz~3 GHz)全球化无线传输技术难以满足移动用户对于无线全覆盖的低时延、超高速、高服务质量传输需求。无线通信需向微波高端开发新频谱资源,实现高速无线传输。毫米波是指波长从 10 mm 至 1 m、频率从 30 GHz 至 300 GHz 的电磁波。毫米波在大气传播过程中主要被氧气和水蒸气吸收,如图 1 所示。氧气吸收带 57~64 GHz 被氧气分子吸收的电磁波能量大约为 15 dB/km^[31,32]。水蒸气对电磁波能量的吸收取决于水蒸气多少,在 164~200 GHz 频段范围内,水蒸气吸收电磁波的能量最大可达数十分贝^[32,33]。

除了氧气吸收带 57~64 GHz 频段及水蒸气吸收带 164~200 GHz 频段外,毫米波的自由空间路径传播损失为几分贝/km。反射与衍射所带来的传播路径损失与介质材料及介质材料表面光滑程度有密切关系。虽然反射与衍射所带来的传播路径损失缩小了毫米波传播范围,但有利于研究与探索毫米波的非视距通信机制。毫米波传播的雨水衰减十分严重,其穿透能力也十分差。因此,如何有效抵抗这些衰落特性是毫米波通信成功与否

图1 毫米波海平面衰减及雨水衰减示意^[31,32]

的关键问题。

3 毫米波通信技术标准化

波长短、频带宽的毫米波通信可以有效地解决高速宽带无线接入面临的许多问题且有着广泛的短距离通信应用前景。近年来,电子与电气工程师协会(Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE)利用氧气吸收带 57~64 GHz 频段制定实现吉比特的短距离连接及无线局域网无线传输^[34-36],以解决运行在频段 2.4 GHz 与 5 GHz 的 IEEE 802.11n/ac 等无线局域网的频谱资源瓶颈问题。工业和信息化部为了激发国内毫米波研究领域的积极性,提升我国毫米波技术在全球毫米波无线通信技术领域的地位,2013 年 12 月正式批准颁布 45 GHz 频谱使用建议,划分约 10 GHz (42.3~47 GHz、47.2~48.4 GHz) 和 (40.5~42.3 GHz、48.4~50.2 GHz) 带宽用于无线局域网通信^[37-39],如图 2 所示。

在 2015 年 10 月的世界射频大会期间,国际电信联盟组织(ITU-R)向外界公布了 5G 毫米波的候选频段,涵盖了从 24.25 GHz 到 86 GHz 的

8 个频段。2016 年 7 月美国联邦通信委员会公布了 27.5~28.35 GHz、37~38.6 GHz、38.6~40 GHz、64~71 GHz 共 4 个将近 11 GHz 频宽的毫米波频段,以促进美国通信厂商部署 5G 毫米波通信系统的开发与研究工作,争取在全球毫米波无线通信技术领域占有重要地位。美国联邦通信委员会授权 E 波频段用于超高速无线通信应用,如点到点无线局域网、移动回程链路及宽带接入等场景。

WirelessHD 1.0 标准,简称 WiHD,是一个运行在 60 GHz 频段的无线高清视频传输协议。它的主要目的是实现数米内的电子设备间的无线高速数据传输,实现各种高清通信设备间高清信号无线传输。WiHD 1.1 标准可实现 7 Gbit/s 的数据传输率,通过空间复用可实现 28 Gbit/s 无线传输速率。该标准还提出了通用遥控器的概念,可用遥控器控制所有 WiHD 兼容设备。

以 60 GHz 为载波频带,IEEE 802.11 制定了应用于热点覆盖、办公室等环境的 IEEE 802.11ad 标准^[35]。IEEE 802.11ad 采用阵列天线实现无线局域网阵列传输覆盖,最高传输速率可达 8 Gbit/s。

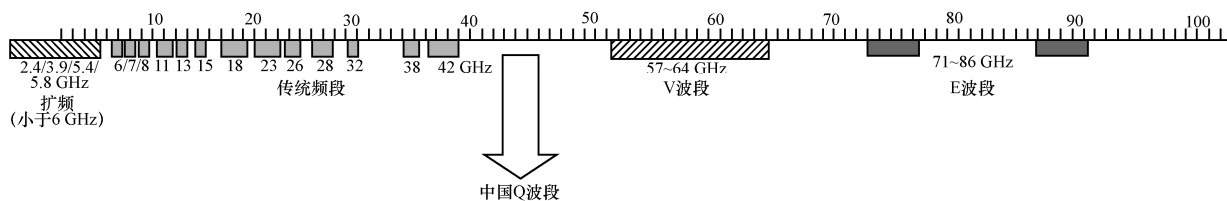


图2 中国 Q 波段示意

而正在制定过程的 IEEE 802.11ay 标准采用数模混合子阵天线架构, 实现最高目标传输速率 20~30 Gbit/s。

在我国毫米波标准化进程中, 以东南大学洪伟教授团队牵头的国内毫米波通信研究人员正在制定以 45 GHz 频段为载波的 IEEE 802.11aj 标准^[40-42], 预计 2017 年年底正式由 IEEE 802.11 组织对外发布此毫米波通信技术协议。与 IEEE 802.11 家族其他局域网标准一样, IEEE 802.11aj 标准主要用于解决办公室局域网、商场等用户终端的无线接入, 实现高速短距离无线覆盖。IEEE 802.11aj 采用阵列天线技术和多天线技术两种传输机制, 通过采用复用技术(最多复用 4 个数据流)实现覆盖半径达 100 m 的 15 Gbit/s 无线传输。

学术界和工业界、政府与大型通信厂商积极开展 5G 通信技术标准化技术研究, 力争在 5G 通信技术领域占领一席之地。目前 3GPP 工作组正在进行研究项目讨论激烈讨论进程中, 预计在 2017 年年底完成“工作项目”的阶段, 产出 phase-0 的标准。为了满足吉比特以上无线传输速率需求, 3GPP 与世界各大型通信厂商目前所规划有关 5G 毫米波相关标准制定的日程, 是预计在 2018 年年中完成 phase-1 标准制定, 频率除了小于 6 GHz 的频段之外, 也将涵盖至 30 GHz 或 40 GHz 的毫米波频段; 2019 年年底前则将完成涵盖至 100 GHz 频段的 phase-2 5G 标准的制定。

4 毫米波通信射频前端

毫米波频段波长短的特性有利于在同等天线口径单元内安装更多的天线单元, 进而提供更高的天线阵列增益。例如, 相对于 2.4 GHz 频段, 同等天线口径条件下 80 GHz 频段下的波束可以附加 30 dB 的增益。大规模天线阵列成为毫米波通信实现一定覆盖距离且高速率无线传输的关键技术。

从多天线理论分析可知, 通过简单地增加收发

端的发射天线数量就可增加通信容量, 同时可以减少收发机的发射功率, 进而实现提升网络容量及减少网络能源消耗的目标。近年来, 受到了广泛关注的大规模 MIMO 通信技术是指基站或者移动终端安置数百或数千根天线, 如图 3(a)所示, 其成为 5G 无线通信系统关键技术的主要原因是采用简单的收发技术就能提供强分集增益、复用增益和阵列增益。大规模 MIMO 通信系统可同时支持的用户数增加, 但是用户数的增加也自然而然地产生大量的用户间干扰、小区间的导频污染等不利于通信的问题。大规模 MIMO 的信道状态系数矩阵为大维矩阵, 而大维矩阵求逆、相乘需要大量的计算复杂度, 因此给信道获取及基带信号处理实现带来相当高的复杂度。而且, 每根发射天线均与射频链路相连接将产生巨大的硬件实现成本。

相对于低频段通信而言, 毫米波频段的数模转换器(DA)、模数转换器(AD)、混合器等成本更加昂贵, 每根天线连接一个 DA、AD、混合器等不是成本有效方案。因此, 利用低成本天线和有限数量的昂贵基带链路设计大规模毫米波 MIMO 收发机成为毫米波通信的关键所在。目前, 大量文献研究如何有效结合数字域预编码与模拟域预编码的点到点数模混合预编码优化方案。所研究的方案主要分为两类: 一是部分连接数模混合预编码方案, 如图 3(b)所示, 二是全连接数模混合预编码方案, 如图 3(c)所示。毫米波数模混合波束成形主要特征为模拟域波束受硬件实现因素的影响, 模拟域波束元素的幅度为常数且只有相位可调节。要真正应用于无线通信, 毫米波通信仍然面临诸多技术挑战, 仍需要解决诸多关键技术。

5 毫米波通信技术挑战

人们研究毫米波无线通信主要因素是其拥有丰富的可利用频谱资源, 可实现吉比特以上的无线通信业务传输速率。受制于毫米波传播特性, 毫米波收发机通常采用大规模天线阵列来弥补严

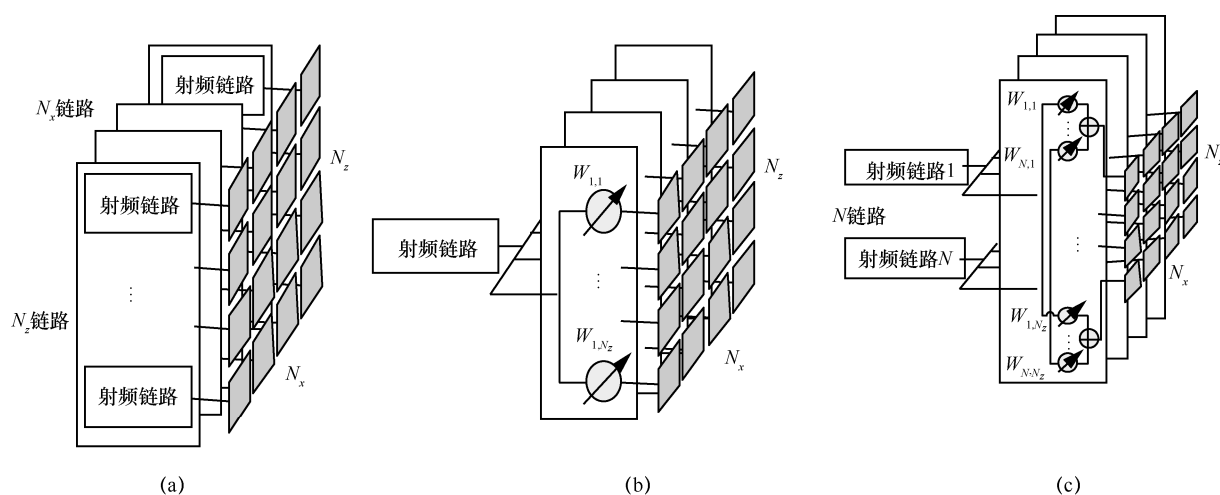


图3 大规模MIMO通信示意

重的空中传播路径损失，同时，采用数模混合大规模天线阵列实现空分复用及阵列增益和实现更高的无线传输速率。然而真正有效地应用毫米波通信技术，人们需要解决一些关键技术与实现挑战问题，如图4所示。

5.1 毫米波通信链路建立

通过对天线阵列的适当设计可使每个天线辐射场型产生正向耦合来大幅提升天线增益，进而形成具有极强方向性和空域分辨性的定向传输波束。随着天线阵列中天线元件数量的增加，天线阵列所形成束的半功率波束宽度变窄，天线阵列中天线元件数每增加一倍，其阵列天线的增益增加3 dB。因此，通过设计大规模阵列天线可以比较

容易地实现传输覆盖区域为100~200 m的小型基站（small cell）覆盖目标。但是，采用定向传输的毫米波收发机需要在建立有效链路之前进行相应的波束对准或者波束扫描，而且，精确快速波束对准是个相当复杂的研究课题。对于低时延、低能耗及高速率的通信系统而言，简单时分扫描不是一种可取的方案。面对5G用户终端对无线通信系统的各种需求极高的条件下，如何有效设计高效地兼容覆盖与传输质量的同步波束训练、移动用户接入波束训练成为无线通信研究的重点方向。

5.2 毫米波动态波束校准

运行在低于6 GHz频段的LTE通信系统中收发机均采用全方向传输方式，可实现全向发送与接

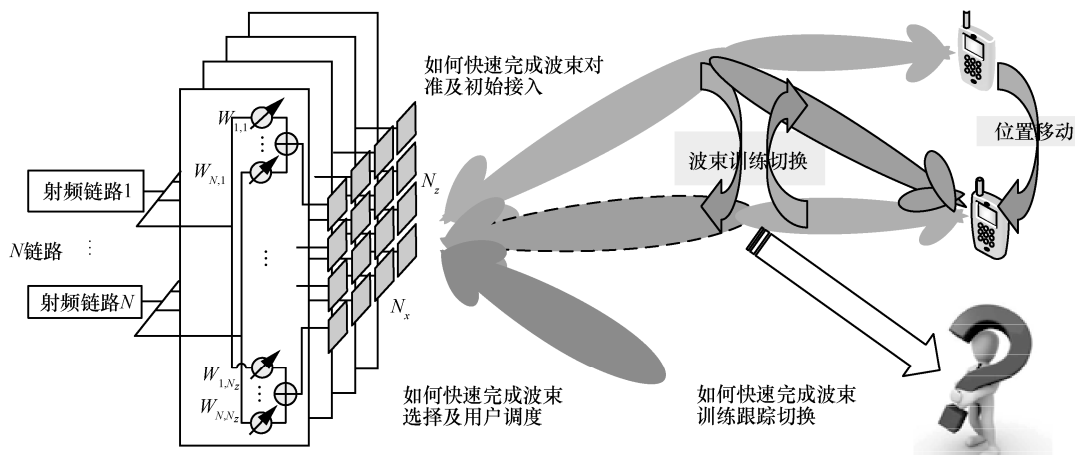


图4 毫米波通信关键技术示意

收。因此,收发机位置移动除了可能带来的信号强度变化外,通常不会影响全向接收信息。采用天线阵列的毫米波频段通信系统的波束半功率波束宽度随着天线阵列中天线元件数增加而变窄,窄波束指向性传输对通信终端的移动特别敏感。位置移动变化导致原有波束对准通信链路变成不可靠或者中断物理通信链路,进而无法实现有效通信。例如在收发机之间悬挂一道垂帘线状珠子,且旁边放一台风扇在不断吹风,使垂帘线状珠子不停地左右摇摆的环境中,毫米波通信系统将一直处于波束扫描校准过程,而无法建立有效的通信链路。因此,收发机的位置变化极大影响波束链路的信号强度,甚至出现波束无法覆盖接收端的现象。

移动无线通信典型情境之下,毫米波通信又衍生出波束快速跟踪对准问题,也就是如何使天线阵列所形成的波束能够在初始波束对准的基础上随着收发机位置变化而及时准确地调整各自的通信波束方向,以提供移动传输并始终维持好的通信质量。无线通信技术研究需要研究如何在高效初始波束对准的基础上,研究适应收发机移动环境下的波束追踪对准算法也成为极需要解决的毫米波通信关键技术。支持适应5G增强型行动宽带应用场景的高效速率自适应及动态波束跟踪切换是毫米波能够真正应用于未来无线通信的关键问题。

5.3 毫米波多用户通信

受限于毫米波频段的传输特性,毫米波传输的覆盖范围只有100~200 m,即形成小型基站覆盖或人口密集的小型区域热点覆盖。针对通信终端稠密区域,多用户通信是提升系统容量的有效方法,也就是如何充分利用多用户通信技术是进一步提升毫米波通信容量的关键所在。大规模毫米波天线阵列通常采用恒模的相控器来实现模拟波束成形,其波束优化设计完全不同于低频段的预编码设计方案。同时,数字域及模拟域之间相互耦合,使得难以设计出使通信系统性能达到最

优的数模混合预编码方案。虽然,已有大量关于点到点到数模混合预编码波束设计的研究,但这参考文献都假设完全已知信道状态^[21-28]。针对大规模天线阵列通信系统而言,获取精确的信道状态信息是极具挑战的课题。因此,研究基于统计信息或者到达角或者离开角的数模混合编码方案是毫米波通信研究的主要途径。同时结合上述毫米波模拟域波束初始接入及动态跟踪及切换方案,研究基于等效信道的数模混合毫米波通信方案。利用毫米波大规模天线阵列的定向传输及空域分辨特性,研究联合空分多址的用户调度机制则成为毫米波多用户通信系统的关键技术。

5.4 信道状态信息获取

毫米波通信系统采用大规模相控阵天线弥补毫米波空间传播的大路径。虽然大规模相控可以有效地提高毫米波信号的能量,然而也提出了一个挑战性问题,即如何有效地设计大规模天线系统的信道,以获取需要的训练序列及估计信道状态信息。信道测量分析表明毫米波信道具有明显空域稀疏性或者角度域稀疏性,基于这一特性,人们可以利用经典的压缩感知理论研究毫米波信道状态信息的获取问题。结合模拟域的波束成形问题,探索研究获取模拟域等效信道状态信息也是一种有效方案,而且可以有效降低信道系数估计的复杂度及基带信号处理难度。

5.5 高效基带信号处理技术

根据信号处理理论可知信号采样率与信号带宽密切相关,毫米波通信系统的信号带宽至少为数百兆,进而信号采样率也至少为数百兆,甚至可能超过吉赫兹,这样,毫米波通信系统基带信号处理面临着单位时间内需要处理海量数据的问题,特别是针对数模混合天线系统架构下其基带采样数据量将更加不可估量。因此,毫米波通信系统的收发机架构体系将完全不同于现有低频段通信系统的硬件架构体系。面对毫秒级低时延的未来无线通信系统要求,如何设计高效的基带信



号处理算法是毫米波基带信号处理需要研究解决的关键问题。也就是说人们需要从高性能计算角度研究可以并行化处理的基带信号处理算法，如同步算法、信道估计算法、数据均衡解调算法等的并行硬件实现架构。

6 毫米波通信性能测试

在 IEEE 802.11 组织、全国信息标准委员会及东南大学洪伟教授组织下，东南大学、华为、中兴通讯、中兴微通、电子四院、联发科等通信公司和高校研究人员协同制定 IEEE 802.11aj 无线局域网通信协议技术规范，实现毫米波（45 GHz）室内高速无线传输目标。东南大学毫米波研究团队主要负责研究 IEEE 802.11aj 协议技术规范的物理层传输技术及部分相关媒体接入控制层接入技术，制定完成全新的 IEEE 802.11aj 协议技术规范的物理层传输机制，包括用于传输控制信息的控制传输模式、传输高速率的单载波多天线传输模式、传输高速率的多载波多天线传输模式。东南大学毫米波团队利用零相关序列设计了适用 3 种多天线传输模式的前导序列结构^[43,44]，与联发科标准团队合作设计了用于识别信道带宽及传输模式的信道估计结

构图案^[45]。东南大学与中兴通讯合作提出一种新颖的基于低密度奇偶校验码的分组编码机制，相比于传统低密度奇偶校验码实现 0.2~0.5 dB 性能增益^[46]。

以 IEEE 802.11aj 无线局域网技术规范为准绳开发了毫米波多天线无线传输演示系统原型机，如图 5 所示。该平台支持两发四收多线架构且可实现覆盖范围近百米的物理层吞吐率为 4 Gbit/s 毫米波无线传输，进而验证毫米波多天线多数据传输的可能性及潜能。在 IEEE 802.11aj 研究基础上，正在开展毫米波 5G 关键通信技术研究，拟验证毫米波 200 m 热点覆盖区域内实现峰值达 10 Gbit/s 以上的无线传输方案。

7 结束语

在全面回顾毫米波通信技术的研究现状、发展趋势的基础上，分析了毫米波通信系统面临的技术挑战。从实现毫米波通信的复用增益及分集增益的角度，分析了毫米波通信的数模混合天线形成架构真正应用于实际通信系统中毫米波技术的技术挑战与仍需要解决的问题，并介绍了目前在实现 IEEE 802.11aj 局域网协议技术规范方面的原型机进展及取得的研究成果。

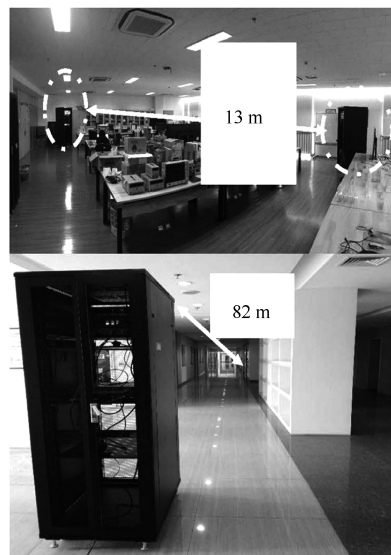
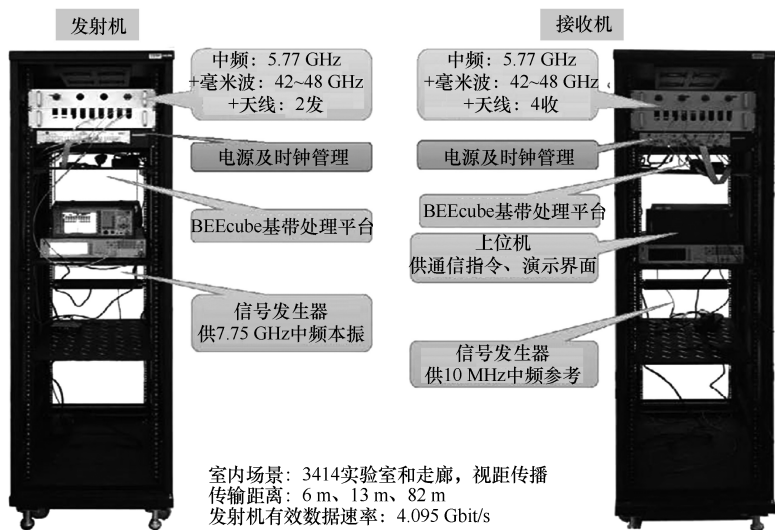


图5 毫米波通信演示平台示意

参考文献:

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN C, et al. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014(6): 1065-1082.
- [2] GAO Z, DAI L, MI D, et al. Mmwave massive MIMO based wireless backhaul for the 5G ultra dense network[J]. IEEE Wireless Communications, 2015(10): 13-21.
- [3] RUSEK F, DANIEL P, LAU B, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013(1): 40-60.
- [4] SUN S, RAPPORT T, et al. MIMO for millimeter-wave wireless communications: beamforming, spatial multiplexing, or both?[J]. IEEE Communications Magazine, 2014(12): 110-121.
- [5] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2014(5): 551-563.
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2014(5): 551-563.
- [6] RAPPAPORT T, HEATH R, DANIELS R, et al. Millimeter wave wireless communications[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall Press, 2015.
- [7] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E, et al. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014 (3): 366-385.
- [8] RAPPAPORT T. Wireless communications: principles and practice[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall Press, 1996.
- [9] GAO X, EDFORS O, RUSEK F, et al. Linear pre-coding performance in measured very-large MIMO channels[C]//2011 IEEE Vehicular Technology Conference, Sept 5-8, 2011, San Francisco, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [10] GAO X, TUFVESSON F, EDFORS O, et al. Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz[J]. Signals Systems and Computers, 2012: 295-299.
- [11] GAO X, EDFORS O, RUSEK F, et al. Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3899-3911.
- [12] HOYDIS J, HOEK C, WILD T, et al. Channel measurements for large antenna arrays[C]//2012 International Symposium on Wireless Communication Systems, Aug 28-31, 2012, Paris, France. New Jersey: IEEE Press, 2012: 811-815.
- [13] ZHAO H, MAYZUS R, SUN S, et al. 28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city[C]//2013 IEEE International Conference on Communications, June 9-13, 2013, Budapest, Hungary. New Jersey: IEEE Press, 2013: 5163-5167.
- [14] SAMIMI M, WANG K, AZAR Y, et al. 28 GHz angle of arrival and angle of departure analysis for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York city[C] // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), June 2-5, 2013, Dresden, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [15] GUSTAFSON C, HANEDA K, WYNE S, et al. On mm-Wave multipath clustering and channel modeling[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(3): 1445-1455.
- [16] SWINDLEHURST A L, AYANOGLU E, HEYDARI P, et al. Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9): 56-62.
- [17] WANG J. Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems[C]//2009 IEEE Global Telecommunications Conference, Nov 30- Dec 4, 2009, Honolulu, HI, USA. New Jersey: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [18] XIA P, YONG S K, OH J, et al. Multi-stage iterative antenna training for millimeter wave communications[C] // 2008 IEEE Global Telecommunications Conference, Nov 30-Dec 4, 2008, New Orleans, LO, USA. New Jersey: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [19] WirelessHD. WirelessHD Standard, WirelessHD specification version 1.1 overview[S/OL]. (2010-05-01)[2011-05-16]. <http://www.wirelesshd.org/pdfs/WirelessHD-Specification-Overview-v1.1> May 2010. pdf.
- [20] ZHANG X, MOLISCH A, KUNG S. Variable-phase-shift- based RF baseband codesign for MIMO antenna selection[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11): 4091-4103.
- [21] AYACH O E, RAJAGOPAL S, ABU-SURRA S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Transactions Wireless on Communications, 2014, 13(3): 1499-1513.
- [22] ALKHATEEB A, AYACH O E, LEUS G, et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5):831-846.
- [23] SOHRABI F, YU W. Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale MIMO systems[C]//2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, April 19-24, 2015, Brisbane, QLD, Australia. New Jersey: IEEE Press, 2015:2929-2933.
- [24] MENDEZ-RIAL C, RUSU R, GoNÁLEZ-PRELCic N, et al. Dictionary-free hybrid precoders and combiners for mmWave MIMO systems[C]//2015 IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, June 28-July 1, 2015, Stockholm, Sweden. New Jersey: IEEE Press, 2015:151-155.
- [25] CHEN C. An iterative hybrid transceiver design algorithm for millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(3): 285-288.
- [26] SINGH J, RAMAKRISHNA S. On the feasibility of codebook-based beamforming in millimeter wave systems with multiple antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5): 2670-2683.
- [27] GAO X, DAI L, HAN S, et al. Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 998-1009.
- [28] HE S, QI C, WU Y, et al. Energy-efficient transceiver design



- for hybrid sub-Array architecture MIMO systems[J]. IEEE Access, 2006(4): 9895-9905.
- [29] ALKHATEEB A, HEATH R W. Frequency selective hybrid precoding for limited feedback millimeter wave systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(5): 1801-1818.
- [30] PI Z, KHAN F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2011(6): 101-107.
- [31] RAPPAPORT T, MURDOCK J, GUTIERREZ F. State of the art in 60 GHz integrated circuits & systems for wireless communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2011(8): 1390-1436.
- [32] THEODORE S, RAPPAPORT, SHU S, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work![J]. IEEE Access, 2013(1): 335-349.
- [33] SUNDEEP R, RAPPAPORT T. Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014(3): 336-385.
- [34] IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: IEEE Std. 802.11-2012, Part 11[S]. 2012.
- [35] IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. Amendment 3: Enhancements for very high throughput in the 60 GHz band: IEEE Std. 802.11ad-2012, Part 11[S]. 2012.
- [36] IEEE. IEEE standard for air interface for broadband wireless access systems: IEEE Std. 802.16-2012[S]. 2012.
- [37] IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. Amendment 5: Enhancements for very high throughput to support chinese millimeter wave frequency bands (60 GHz and 45 GHz): IEEE Std. 802.11aj-2016, Part 11[S]. 2016.
- [38] 工业和信息化部. 关于发布 40-50 GHz 频段固定业务中点对无线接入系统频率使用事宜的通知: [2013]500 号[EB]. 2013. Ministry of Industry and Information Technology. Notification of the frequency use of the point-to-point wireless access system in the fixed business of the 40-50 GHz band: No.500[2013][EB]. 2013.
- [39] 工业和信息化部. 关于发布 40-50 GHz 频段移动业务中宽带无线接入系统频率使用事宜的通知: [2013]502 号[EB]. 2013. Ministry of Industry and Information Technology. Notification of the use of broadband wireless access systems in the 40-50 GHz band mobile service: No.502[2013][EB]. 2013.
- [40] IEEE. Channel measurement for IEEE 802.11aj (45 GHz): IEEE 802.11-12/1361r3[S]. 2013.
- [41] IEEE. IEEE 802.11aj usage models document: IEEE 802.11-12/1245r4[S]. 2013.
- [42] IEEE. Complete proposal for IEEE 802.11aj 45 GHz: IEEE 802.11-15/0707r1[S]. 2015.
- [43] WANG Y, HE S, SUN Y, et al. Joint timing synchronization and channel estimation based on ZCZ sequence set in SC-MIMO-FDE system[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2016(1):1-17.
- [44] WANG H, GAO X, JIANG B, et al. Efficient MIMO channel estimation using complementary sequences[J]. IET Communications, 2007, 1(5): 962-969.
- [45] IEEE. Bandwidth and packet type detection schemes for 40-50GHz millimeter wave communication: IEEE 802.11-15/0706[S]. 2015.
- [46] IEEE. Packet encoding solution for IEEE 802.11aj(45 GHz): IEEE 802.11-14/1387[S]. 2014.

[作者简介]



何世文 (1978-), 男, 博士, 东南大学信息科学与工程学院助理研究员, 主要研究方向为毫米波通信、智能优化理论和多天线技术协作通信技术。



黄永明 (1977-), 男, 东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师。教育部“长江学者奖励计划”青年学者, 国家优秀青年科学基金和江苏省杰出青年基金获得者。近几年主要研究多天线宽带无线通信理论与技术。



王海明 (1975-), 男, 博士, 东南大学信息科学与工程学院副教授、博士生导师, 主要研究方向为毫米波无线通信、卫星移动通信、多频宽带天线与阵列和电波测量与信道建模方面。

洪伟 (1962-), 男, 博士, 东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师。教育部“长江学者计划”特聘教授, IEEE Fellow, 中国电子学会会士, 中国电子学会微波分会副主任委员、天线分会副主任委员, 国家杰出青年基金获得者。获得国家自然科学奖 2 项、部省科学技术进步奖一等奖 3 项等多项科技奖。