

面向未来 5G/6G 的毫米波通信研究现状及进展

程龙

现代无线通信网络已经成为支撑经济繁荣和国家竞争力的基础，并成为人类社会信息共享与协作的基础平台。随着视频直播、高清电话会议、虚拟现实游戏和全息图像等高带宽信息产业的快速发展，同时在一些特殊应用场景例如高铁、国防存在高速率传输的需求，这些都对全球移动数据传输迎来了更大的挑战。短短十年间，无线网络处理数据已经超过原有的 100 倍。如今，智能手机数据通信需求已经达到了每月 6EB（Exabytes，艾字节），如果考虑便携式笔记本、平板电脑、以及 M2M（machine-to-machine，机器对机器）等设备之间的通信，整体的数据需求达到每月 11EB。现存无线通信系统采用的 700MHz-2.6GHz 许可频段受限于有限的频谱资源，无法满足指数级增长的数据需求。毫米波频段由于其丰富的频谱资源，能够提供比传统低频段更大的通信带宽（1GHz 或者更大），同时具有更小的频谱干扰，成为未来 5G、6G 移动通信网络的核心技术。

一、毫米波传播特性

1、毫米波频段划分

通常我们所说的毫米波频段是指 30GHz-300GHz，相应波长为 1mm-10mm，而目前主要受关注的频段为 28-30GHz，38GHz，45GHz，57-71GHz，71-76GHz，81-86GHz，100GHz 等频段，其主要划分如图 1。

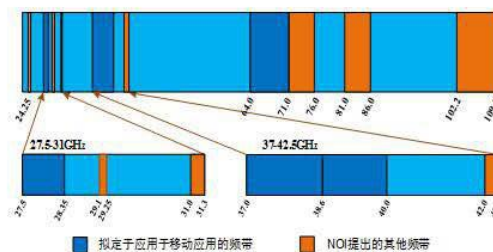


图 1 毫米波通信主要频段

2、毫米波信道衰减特性

毫米波通信系统具有独特的信道传播特性，相对于低频段信道特性，具有更大的自由空间路径衰减，同时受到氧气和雨水影响，体现出几个典型的“大气窗口”频率和衰减峰。例如图 2 中所示，在 35GHz、94GHz、220GHz 频段，毫米波受到衰减较小，为典型的“大气窗口”，这些频段比较适合用于点对点通信，已经被低空空地导弹和地基雷达采用。而在 60GHz、180GHz 等频段，信道特性体现出极大的衰减值，高达 15dB/km 以上，为衰减峰，比较利于应用在抗干扰和保密通信中。同时，毫米波频段也受到雨水衰落的影响，随着降雨量的增加呈现衰减加大的趋势，例如图 2。

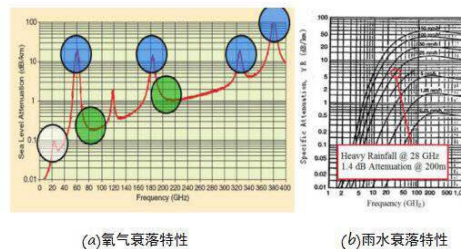


图 2 毫米波传播衰减特性 (原图来源 T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" IEEE Access, vol. 1, pp. 335-349, May. 2013.)

3、毫米波传播粒子特性

毫米波频段由于波长 (1-100mm) 远小于低频段 6GHz 以下的系统的信号波长，其信号传播粒子特性明显，在存在障碍物阻挡情况下，绕射散射能力差，如图 3。毫米波传播的粒子特性缩小了其传播范围，限制了毫米波传输场景大部分存在于视距传输下。

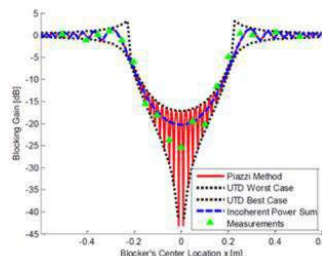


图 3 毫米波传播障碍物阻挡实验 (原图来源 网络)

二、毫米波通信系统设计关键技术

1、大规模天线技术

由于毫米波频段传播中的自由空间路径损耗以及穿透损耗远大于低频段，高增益天线多被应用在毫米波通信系统中提供一定的波束成型增益，这样可以在利用毫米波频段的宽带优势同时提高覆盖范围。虽然通过增加发射端的功率也可以提高相同的链路容量，但是受限于毫米波器件有限的功率放大倍数，提高天线增益被广泛的使用。另外，毫米波频段波长较短的特性，有利于在同等天线孔径内安装更多的天线单元，例如相对于 2.4GHz 频段，同等天线口径条件下 80GHz 频段下的波束可以附加 30dB 增益。综上所述，大规模天线技术成为毫米波通信系统中实现更远通信距离和更高链路容量的关键技术。

传统微波系统中使用有限的天线进行波束成型，通常在数字基带进行天线权值设计。然而，毫米波频段使用大规模天线阵列和更大带宽，传统的数字波束成型结构会带来硬件成本和功耗的提高。相对于低频段的 DAC/ADC (digital-to-analog converter/analog-to-digital converter, 数模/模数转换)，LNA (low-noise amplifier, 低噪放) 等器件，毫米波频段的器件由于带宽较大，频段高，功率消耗更大，成本更高，例如表 1 列出毫米波不同前端器件在多天线系统中的功耗，而表 2 列出截止 2018 年 ADI 厂商高采样率和高采样位宽 ADC 的功耗和价格。同时，传统数字波束成型结构每个天线单独供应一个射频链路，在大规模天线架构下，硬件成本功耗急剧增加。另外，在进行数字信号处理的时候，多个天线端单独进行数字采样会造成多个并行的 Gbit 数据流进行处理，增加了基带信号处理的计算复杂度。

表 1 毫米波不同器件功耗

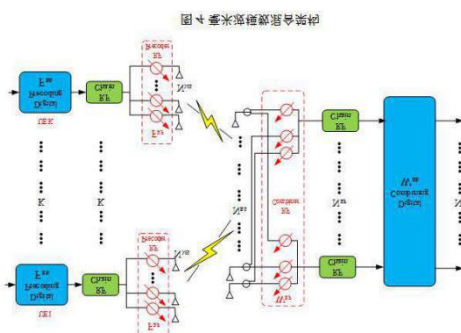
器件	器件个数	功耗 (mW) (单个器件)
PA	$N(N_i)$	40-250
LNA	$N(N_i)$	4-86
Phase Shifter	$N(N_i) * L(L_i)$	15-110
ADC	$L(L_i)$	15-795
VCO	$L(L_i)$	4-25

表 2 ADI 公司 ADC 产品列表 (采样率: ≥ 20 SPS, 2018 年)

型号	通道数	位宽(bits)	采样速(SPS)	功耗(W)	价格(美元)
AD9689-2000 (NEW)	2	14	2G	2.5	\$934.86
AD9689-2500 (NEW)	2	14	2.5G	3.1	\$1,108.34
AD9213	1	12	10G	5.1	
AD9208	2	14	3G	3.3	\$1,326.00
HMCAD5831	1	3	26G	4.2	
AD9625-2000	1	12	2G	3.48	\$624.75
AD9625-2500	1	12	2.5G	3.9	\$918.74
AD9625-2600	1	12	2.6G	4	\$1,046.78

为了解决毫米波大规模阵列天线面临的以上问题，如何利用低成本天线和有限的基带链路设计大规模毫米波收发结构成为目前研究的关键。目前，大量文献多集中研究以下两个方面：

一、研究同时在数字和模拟域进行混合预编码的优化方案和结构，通过少量的数字基带链接多个收发天线，然后设计结合数字预编码和模拟预编码的组合编码方案采样信道数据和发射信号，例如图 4 中为标准毫米波混合架构。



二、研究毫米波频段低功耗基带、射频器件。在传统毫米波通信系统中，一条完整的射频链路包括 ADC/DAC、LNA，VCO（voltage controlled oscillator，压控振荡器）等器件，其中 ADC 的功耗在整个射频链路中占主导地位。ADC 模块的功耗和采样率呈线性关系，同时与 ADC 量化位宽呈指数增长的关系。例如表 2 中所示，在单通道，高采样率（2.6GSample/s），高采样精度（12bit）条件下，单个 ADC 功耗达到 4W。如果考虑毫米波 Massive MIMO 系统中存在 128 个射频链路，那么其总功耗达到 512W。因此现阶段的文献多研究低比特量化的 ADC，从而降低毫米波通信系统整体链路功耗，例如图 5 中每个射频链路连接两个低比特的 ADC 进行采样，通过降低基带采样的精确性降低电路整体功耗。

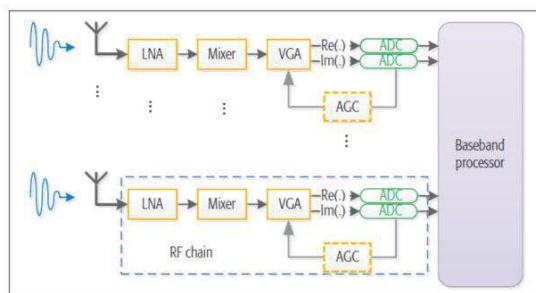


图 5 毫米波 Massive MIMO 低比特接收机(原图来源 J Zhang et al "On Low-Resolution ADCs in Practical 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Systems", IEEE Commun. Mag., vol. 56, no. 7, pp 205-211 April 2018)

2、低复杂度的信道估计技术

传统 MIMO 通信系统中，多假设信道为复散射瑞利信道，使用 LS（最小二乘）方法进行信道估计，其发送导频序列的长度随着 MIMO 信道矩阵维度的增加而增加。在毫米波 Massive MIMO 系统中，大规模阵列天线带来的信道矩阵为大维矩阵，而大维矩阵求逆、相乘需要更高的计算复杂度，同时需要发送更多导频信息，占用传输带宽，造成系统吞吐量下降。与此同时，低频段 MIMO 多使用全数字结构采样信道数据，而在毫米波 Massive MIMO 中，多采用混合波束架构采样信道数据，射频通道与天线之间并非一一对应的全连接，一个射频通道对应多个天线。在这种结构中，数字端口不能直接对整个信道进行数字化，这也称为信道子空间采样限制，将增加信道估计所需导频开销。以上这些，都为毫米波多天线系统的信道信息获取带来了更大的难度和计算复杂度。

如上所示，研究低复杂度、低导频开销的毫米波多天线系统信道估计是毫米波系统设计重要问题。经过大量的毫米波信道测量表明，其信道具有空间域稀疏的特性，通过空时傅里叶变换对可以将毫米波大规模天线信道稀疏表示在波束域，如图 6。通过利用毫米波 Massive MIMO 信道的稀疏性，可以利用压缩感知等技术有效估计信道并降低导频开销。

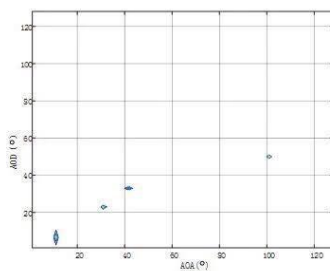


图 6 毫米波束域表示

3、 功率放大器非线性失真

为了提高毫米波通信系统的覆盖范围，系统需要射频前端提供大的发射功率。为了满足功率放大需求，功放多工作在接近饱和点的非线性区域，由此带来强烈的非线性失真。为了获得线性输出，功放多采用功率回退形式。同时，由于受到毫米波器件工艺和技术的限制，毫米波器件功放输出功率提高很困难，这在 CMOS 功率放大器上更为明显，例如表 3 列出了不同工艺的毫米波功放参数。因此，研究高效率的毫米波功放器件成为未来重要研究方向。

表 3 毫米波功率放大器

Reference	ISSCC2015	ISSCC2016	ISSCC2017	ISSCC18	ISSCC18
Technology	40nm UTBB SOI	28nm CMOS	40nm CMOS	65nm CMOS	130nm SiGe
Freq.(GHz)	60	30	27	28	19-29.5
Vsupply(V)	1	1	1.1	1.1	1.9
Gain(dB)	15.4	15.7	22.4	15.8	20
PI(dBm)	18.2	13.2	13.7	14	15.2
Psat(dBm)	18.8	14	15.1	15.6	17
PAE1(dB%)	21	34.3	31.1	34.7	39.2
PAEmax(%)	21	35.5	33.7	41	43.5
Area(mm ²)	0.16	0.16	0.23	0.24	0.29

4、 相位噪声

理想本振信号是一个单音信号，但是实际系统中的本振伴随着随机的相位抖动和周期性杂散，这种本振信号抖动现象称为相位噪声。在传统低频段 OFDM 系统中，相位噪声能够影响不同子载波间的正交性从而降低系统性能。在毫米波频段，由于频段的升高，相位噪声带来的影响比低频段更严重，例如在实际 60GHz 系统的测试中，相位 0.3 微妙的变化高达 30 度，如图 7。

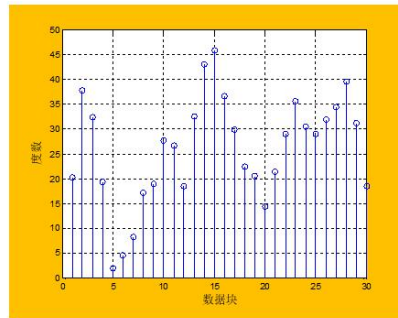


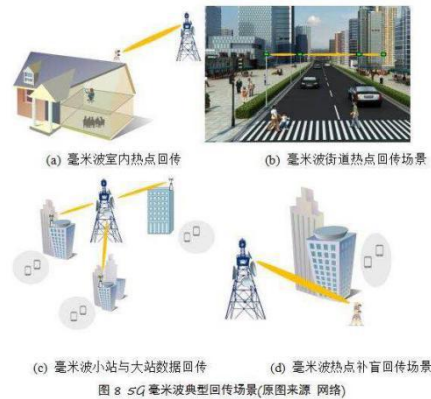
图 7 60GHz 系统实测相位变化

三、毫米波应用场景

当前毫米波通信系统利用毫米波频段大带宽、高速率的特点，主要应用场景集中在 5G 网络中的小基站间替代光纤回传，热点地区数据传输覆盖，设备之间的高清视频大容量数据传输等。近年来，随着信息技术的发展和新的数据传输应用需求的出现，传统的毫米波通信场景已经无法满足这些需求，新型的特殊应用场景已经出现，例如高速轨道交通毫米波回传场景。另外，毫米波本身具有很强的隐秘性和抗干扰性，在大气中传输使用小口径天线就可以获得极窄波束和很小旁瓣，所以新的远距离，高速率、抗截获军事应用场景也正在被研究。

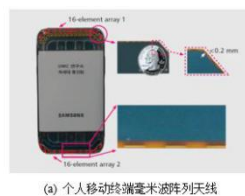
1、未来通信网络小站回传场景

毫米波频段用于移动通信网络小站回传主要具有四点优势：第一、频谱资源纯净，电磁干扰少，部署时候无需扫频。第二、频谱资源丰富，足够分配使用；第三，适合分配较大的信道带宽（1GHz）；第四、使用高增益天线获得极窄波束，降低旁瓣同时减少相邻干扰，利于频率复用。如图 8 中所示，典型应用场景包括室内热点回传场景、街道热点回传场景、小站与基站数据回传、城市热点补盲回传等。从以上场景可知，传统毫米波回传场景特点为：高传输速率，高可靠，低传输时延、同时连接数较低。



2、毫米波热点地区接入场景

随着未来虚拟/增强现实、三维视频、交互式游戏和全息图像等高宽带新兴业务的快速普及，未来 5G/6G 网络传输容量进一步的提升仍任重道远。通过利用毫米波频段波长短易配置多天线的优点，我们可以在个人移动终端放置天线阵列，同时使用毫米波频段接入基站提高网络传输容量，例如图 9(a)中显示了手机端天线阵列的大小，可见毫米波阵列天线可以很好嵌入终端中，而图 9(b)显示了典型的个人移动设备接入无线网络的场景。



3、高速轨道交通回传场景

未来高速铁路通信系统中，为了满足用户高清视频、大容量网络数据、以及铁路自身监控数据回传的需要，急需研究在高速移动场景下的大带宽无线移动回传系统。最近国际上已经有部分国家开展了前期的系统设计以及测试工作，例如图 10 所示，韩国 2017 年在首尔地铁

开展了毫米波车地通信的低速测试，并且达到了单用户 1.2Gbps 的下行速率。

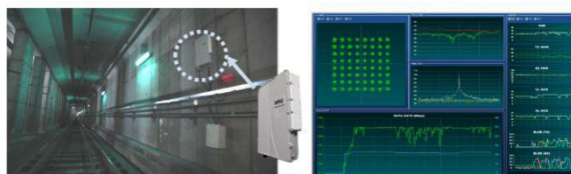


图 10 韩国首尔毫米波车地通信 (原图来源 网络)

四、 结束语

毫米波通信是未来无线移动通信重要发展方向之一，目前已经在大规模天线技术、低比特量化 ADC、低复杂度信道估计技术、功放非线性失真等关键技术上有了明显研究进展。但是随着新一代无线通信对无线宽带通信网络提出新的长距离、高移动、更大传输速率的军用、民用特殊应用场景的需求，针对毫米波无线通信的理论研究与系统设计面临重大挑战，开展面向长距离、高移动毫米波无线宽带系统的基础理论和关键技术研究，已经成为新一代宽带移动通信最具潜力的研究方向之一。

本文作者：[程龙](#)，电子科技大学博士研究生，chenglong_office@163.com

(本文原载：微信公众号：临菲信息技术港)

