

# 6G新天线技术

WHITE PAPER V7.0 E  
2020.11



# 6G新天线技术

Novel Antenna Technologies towards 6G

2020

## 摘 要

为了支持6G更高频段、更大带宽的传输，实现超高传输速率，业界普遍预计6Gs射频与天线系统将引入更高频点、更小体积、更大规模、及更加灵活与可重构等特征。为了适应这一技术趋势的发展，本白皮书针对6G潜在的新天线技术，从标准演进需求、毫米波与太赫兹天线、智能反射表面、液体与透镜天线等角度，阐述了面向6G新应用与使能技术的天线发展路线图，总结了6G天线技术研究的主要现状。

## Executive Summary

In order to support the transmission of the sixth generation mobile communications system (6G) in higher frequency band and wider bandwidth, and to realize ultra-high transmission rate, it is generally expected that 6G will introduce novel RF and antenna technologies with features of higher frequency point, small size larger scale, more flexibility and reconfigurability. In order to meet the development requirement of this technology trend, this white paper describes the development roadmap of 6G antenna technologies for new applications and enabling technologies from the perspectives of standard evolution requirements, millimeter wave and terahertz antenna, smart reflective surface, liquid and lens antenna, and summarizes the main status of 6G antenna technology research.

## 目 录

摘 要 .....	2
Executive Summary .....	3
1 产业界对6G新天线技术的需求与考虑 .....	5
2 终端天线 .....	6
2.1 非毫米波手机天线 .....	6
2.2 毫米波手机天线 .....	7
3 基站天线 .....	12
4 毫米波天线阵 .....	14
5 THz天线 .....	17
6 龙伯透镜天线 .....	19
7 智能反射面 .....	21
8 轨道角动量天线阵 .....	23
9 液体天线 .....	25
10 参考文献 .....	27
致谢 .....	30

## 1 产业界对 6G 新天线技术的需求与考虑

随着6G技术研究的不断深入，一些新的技术，比如太赫兹技术、智能超表面技术等已逐渐成为业界关注的热点，且业界对将上述技术应用到6G移动系统有较高的期望，但这些新技术与当前一代无线移动通信系统使用的技术还存在一定的差别，这也为后续6G新天线的设计带来了较大的挑战。

从支撑6G移动通信技术角度来说，为了支持6G移动通信系统更高的数据传输速率以及网络智能化等需求，6G天线预计需要具备更高的能力，比如在支持传统MIMO技术的同时，能够支持更宽的频段、同时加入感知通信、数字波束控制、AI赋能等能力，以便能够更好的满足未来6G技术更大容量数据传输、更加智能化通信的需求。

从产业化角度来说，我们认为6G新天线最终在技术商用前需要具备体积小、重量轻、低成本、低功耗、架构灵活等特点，同时希望能实现关键芯片/器件的国产化，以便最大限度降低对国外产品依赖。但对于国内的6G新天线技术来说，尤其是以太赫兹超高频天线技术，目前还普遍存在关键器件国产化程度低、成本高、功耗大、产业成熟度低等系列问题，目前的设计方案还无法集成到基站或终端设备中，距离产业化也还具有很大的差距。

为了解决上述问题，我们认为6G新天线技术还需要同时结合6G移动通信技术需求和未来产业化的需求，业界联合进行更多的研究和探索工作。对于现阶段的工作，希望各界在研究新天线技术原理的同时，能够搭建原理验证平台来对相关的6G新天线技术研究成果进行测试和验证工作，同时也希望各界能够建立有效的信息分享和沟通渠道，比如通过FuTURE论坛技术来分享6G新天线技术测试验证的结果，以便业界能形成合力、加快6G新天线技术研究和产业化的进程。

## 2 终端天线

手机是现今最广为熟知与使用，且内部系统环境高度复杂的无线手持移动终端产品，故本章以手机作为无线移动终端的代表，进行其天线方案及设计的探讨。而5G频段可分为非毫米波段与毫米波段，根据3GPP目前的定义，非毫米波段（又称为FR1）的频率范围为410 MHz–7.125 GHz；而毫米波段（又称为FR2）的频率范围为24.25 GHz–52.60 GHz，因上述两波段的频率（亦即对应的波长）差距甚大，故其电磁行为差异甚为明显，因而对应此两波段的天线方案、设计，与性能要求也截然不同，且两波段的应用场景亦有明显区别（如在5G增强型移动宽带（enhanced mobile broadband, eMBB）场景下，非毫米波为连续广域覆盖的子场景应用，而毫米波则为热点高容量的子场景应用，此两场景基本为择优互补的理念），故此章分别从非毫米波与毫米波此两波段的视角进行对应的手机天线设计分析。

### 2.1 非毫米波手机天线

在非毫米波段，多输入与多输出，即MIMO（与其衍生的massive MIMO）的技术，因可提高系统的信道容量和数据传输速度，故已成为移动通信的关键技术，为了支持更多信道的MIMO，手机故需配置更多数量的天线。随着系统的演进，天线除在数量上的增加外，其所需覆盖的通信频段也更加丰富，如相较于广为常用的4G LTE频段，目前商用主流的5G非毫米波频段便扩增了n77（3.3–4.2 GHz，其内含3.3–3.8 GHz的n78）与 n79（4.4–5.0 GHz）等频段。而对非毫米波段而言，4G LTE与5G手机的天线设计上并无本质的差异，非毫米波段的5G手机天线设计主要的关注点基本上是众多天线间电磁解耦（decoupling）的处理。

基于上述背景，手机MIMO多天线（包含单频、宽频，与多频）的设计，如： $8 \times 8$ 、 $10 \times 10$ ，或 $12 \times 12$  等，皆已见于文献 [1]–[3]，且目前已商用的5G非毫米波手机，亦是采用多天线（且解耦）的设计，以支持更多5G频段与更多信道的MIMO需求。5G非毫米波频段的天线与4G频段天线既可单独分别设计，亦可集成设计。除自身天线相关性能外，尚需考虑板端射频通路（如：频率选择器件的有无与其对应的损耗）的性能估算，以获得总体链路架构的性能最优。

此外，5G手机内的天线数目相较4G手机明显增多，故如何布局以使天线在该环境下的自由空间性能较优外，在各主要使用场景下（左/右手竖屏握持、双手竖屏握持、双手顺/逆时针横屏握持、单手竖屏贴头通话握持、手机平置背贴金属桌等）亦不会同时被用户身体或金属



遮挡以致天线性能大幅恶化，且天线与系统间电磁兼容（EMC，含EMI与EMS）的风险或影响可控，及各天线同时工作于发射模式时人体吸收辐射能量的程度（specific absorption rate, SAR）可接受。电磁解耦（主要关联天线与射频电路性能层级）、链路架构（主要关联总体无线性能层级），与天线布局（主要关联用户场景与人体安规层级）是5G乃至未来通信时代（如：6G）非毫米波或非太赫兹波段手机天线设计的主要重点。

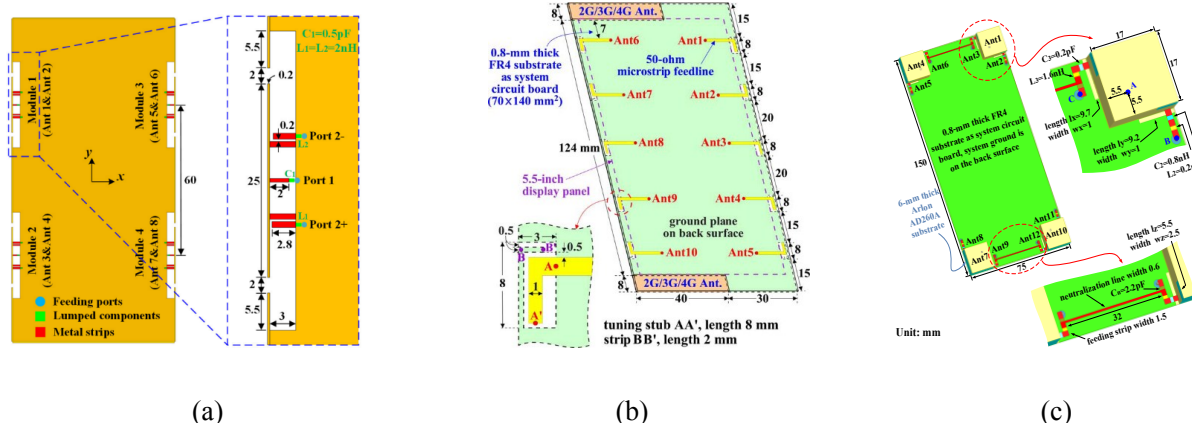


图 2-1 手机非毫米波MIMO天线：(a)  $8 \times 8$  MIMO天线 (3.3–5.0 GHz) [1], (b)  $10 \times 10$  MIMO天线 (3.4–3.8 GHz) [2]; (c)  $12 \times 12$  MIMO天线 (3.4–3.6 GHz) [3]

## 2.2 毫米波手机天线

### 2.2.1 设计需求

**峰值增益：**毫米波相较已用于移动通信的分米波与厘米波有更大的电磁传播损耗，且遮挡（blockage）效应更为明显，而在较易于平面化、易于快速波束变换，且技术较为成熟的考量下，相控阵列天线（phased array antenna）便常被采用作为毫米波段的的天线方案，尤其是对手持移动终端（如手机）而言，以提升天线的增益来增强无线通讯的覆盖距离。同时，由于定向波束增益的提升，对比于相同（或相近）条件下的全向辐射而言，系统可因而有较高的信噪比，故可进一步提高信道容量。而3GPP对于手持终端设备（属power class 3）的5G毫米波天线增益（若不考虑负载牵引效应或负载牵引效应不显著）所对应的等效EIRP（Effective Isotropic Radiated Power）在不同的频段内皆定有不同的最低可接受峰值限值及为避免EIRP过大而影响其他系统的最高EIRP峰值限制 [4]，如下表2-1所示。

**波束覆盖：**毫米波天线阵列由于波束较窄，为了避免造成广大的无线通信盲区，需要采用波束成形（beamforming）技术以实现天线波束在空间的扫描进而达到可接受的空间覆

盖。而于3GPP中，累计分布函数（Cumulative Distribution Function, CDF）便被使用以作为衡量波束空间覆盖范围（spatial coverage或spherical coverage）的方式；而对手持终端类，目前3GPP的规范是自由空间下CDF 50%时对应的EIRP值作为评判依据，具体指标亦如表2-1所示。

**双极化：**此外，信号在毫米波段无线传播的强度往往较弱，且对阻挡较敏感，为有较好的通信效果，双极化辐射的天线设计可减少收发电波的极化失配，进而减少用户无法无线通信连线、中途断线或卡顿的概率，以便可较好地保障用户无线体验；另外双极化天线亦可有助于实现MIMO功能。

**多频段：**3GPP最新已正式编号的5G毫米波授权频段（licensed bands）共有n258（24.25 GHz–27.5 GHz）、n257（26.5 GHz–29.5 GHz）、n261（27.5 GHz–28.35 GHz）、n260（37.0 GHz–40.0 GHz），及n259（39.5 GHz–43.5 GHz）等五个频段 [4]，有鉴于手机的漫游切换以及频段载波聚合（carrier aggregation, CA）的传输提速需求，手机5G毫米波天线常需进行多频段设计。

表 2-1 手持终端（属功率等级3设备）的EIRP（dBm）限值

工作频段	最低峰值EIRP	最高峰值EIRP	空间覆盖50% CDF低限EIRP
n257	22.4	43.0	11.5
n258	22.4	43.0	11.5
n259	18.7	43.0	5.8
n260	20.6	43.0	8.0
n261	22.4	43.0	11.5
备注：最低限值未含测试公差		出处：3GPP TS 38.101-2 V16.4.0 [4]	

### 2.2.2 设计挑战

**馈入损耗：**路径损耗往往是高频工作时首先遭遇的挑战或考量的问题，故在毫米波段操作时，天线的馈入损耗往往明显高于既往分米波或厘米波段通信时的天线馈入损耗，故无论对于手机或基站而言，在毫米波段的天线馈入损耗皆是影响毫米波天线整体性能的首要因子。

**覆盖材料：**此外，于手机天线而言，手机外观材料对天线性能，尤其是对于毫米波段天线，往往有显著的影响。基于外观美学与视觉和握持质感的考量，及整机结构强度的设计，覆盖于天线上方的外观材料可能为介质或金属（如金属边框或金属背盖）。若是金属覆盖于毫米波天线上，则往往会因金属的屏蔽效应，导致毫米波天线的性能严重恶化。如2020年10月发布的一款代表性的5G手机 [5]，便采用两种不同金属外框搭配毫米波版（于金属框上直接挖长

槽以避让毫米波AiP模块)与非毫米波版(金属框完整),即图2-2所示,然而目前图中的金属框设计亦会影响显示屏向侧边延伸的程度,且此长槽填充物所致的外观色差亦肉眼可辨。而即使覆盖材料为介质(如:塑胶/玻璃/陶瓷等),这些介质材质(包含材质的厚度、介电常数,及损耗角正切等)的影响亦会对毫米波天线形成天线罩效应(randome effect),尤其是介电常数越高或损耗角正切越大的材料,其材料厚度变化对毫米波天线性能的影响便越大。

**外观共形:**此外,如何毫米波天线如何与手机的弧边共形,以达圆润且轻薄的外观与握感,对手机外形设计而言往往相当关键。

**复用空间:**手机内空间紧凑局限,天线众多,如何使毫米波与非毫米波进行共口径的整合设计,以复用天线空间,亦是重要的主题。

**与屏兼容:**再者,手机的屏占比日益攀高(如更极致的全面屏、双面屏、瀑布屏等)限制了天线布局空间位置的选择并压缩了天线可获得的有效空间(即所谓的净空区),故如何使天线(包含毫米波与非毫米波天线)和高屏占比的显示屏兼容,亦是急迫的课题。

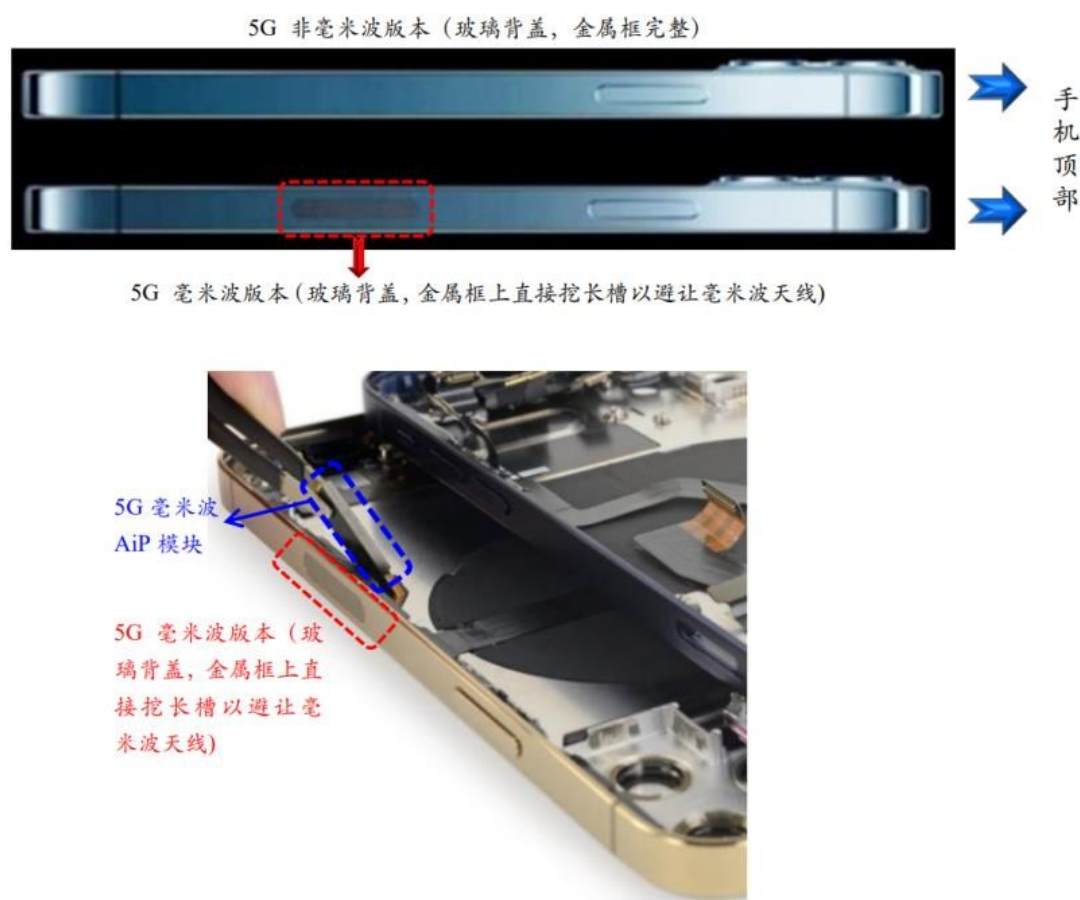
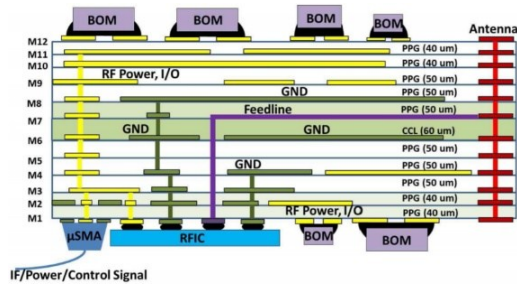


图 2-2 同公司、同时期、同系列手机之金属边框对比侧视实例 [5]

### 2.2.3 对策方案

**馈入损耗:** 目前商用的手机5G毫米波天线主流方案为封装天线方案, 即所谓的AiP (Antenna-in-Package) 方案, 而AiP方案的主要概念是将天线与射频裸片经由IC封装而得的集成式天线解决方案 [6], 以使馈入路径缩短, 而减少馈入损耗, 如图2-3 (a) 所示。美国高通公司自2018年起, 迄今正式发布了三款5G毫米波封装天线, 即QTM 052 (2018年)、QTM 525 (2019年), 及QTM 535 (2020年), 而此三版本的主要演进点包含了覆盖频段的拓展与AiP模块尺寸的变化等。如图2-3 (b) 所示的QTM 052 AiP模块新旧两版本的宽度变化, 新版本的AiP模块因其宽度变小, 故更易于置入厚度较薄或侧边收弧较大的手机内, 从而有助于整机外形与整体设计达到更优的综合竞争力。



(a)



(b)

图 2-3 手机毫米波AiP: (a) AiP文献设计例 [7]; (b) 已商用的5G毫米波AiP模块实例 [8]

**覆盖材料：**为了克服金属外观对天线的屏蔽限制，下述的多篇文献提出了不同解决方案，如有在金属外观上直接开设天线窗口以容纳AiP模块 [9]（如图2-2概念），或是将毫米波天线阵列直接嵌入金属外观上的毫米波AiME (Antennas in Metal Exterior)方案 [10]，甚至将毫米波天线阵列直接嵌入在作为非毫米波天线（如：LTE天线）的金属外观上，即毫米波在非毫米波天线内的共口径设计，称AiA (mm-Wave Antennas in non-mm-Wave Antennas)，如图2-4所示 [11]。此外，为进一步减低AiA的馈入损耗，文献 [12] 便将AiP馈入损耗低的优势与AiA突破金属并兼具非毫米波天线的优势相互融合，即把AiP方案中剪裁掉天线后的馈入封装集成于AiA中作为非毫米波天线的金属外观内侧，而形成AiAiP方案 (AiA integrating a Package)，如图2-5所示。

**外观共形:** 如图2-6所示 [13], AiA可依托内外部金属结构而达良好的外观共形需求。

**复用空间：**AiA与AiAiP因皆为将毫米波内嵌于非毫米波的共口径设计，故可致复用天线空间的设计。

**与屏兼容:**如图2-7示 [14]–[16], AoD (Antenna-on-Display)方案将天线与屏整合设计。



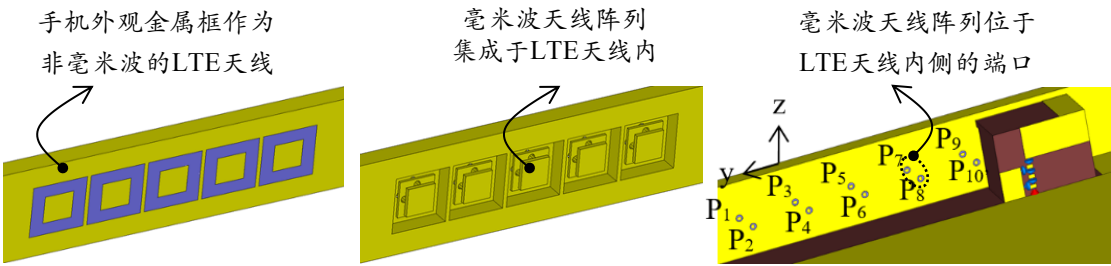


图 2-4 毫米波天线在非毫米波天线内（即AiA）设计 [11]

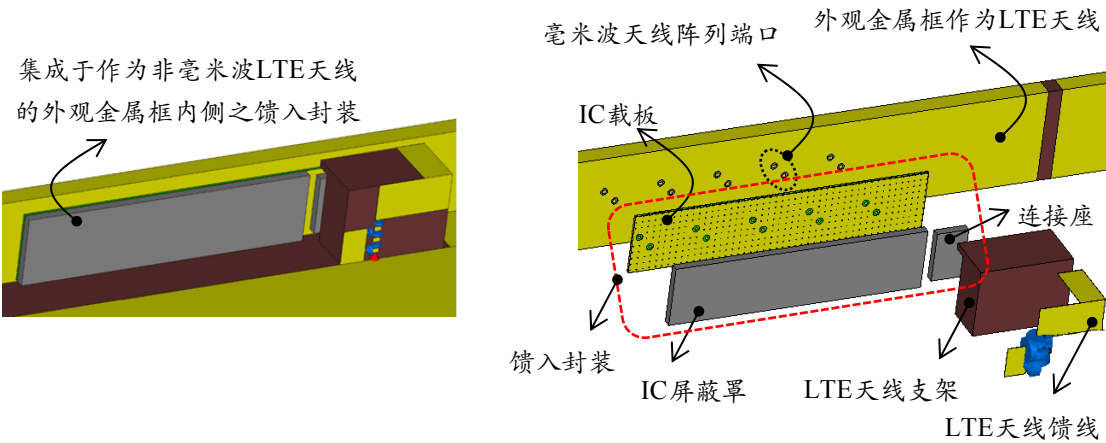


图 2-5 AiA集成封装（即AiAiP）方案 [12]

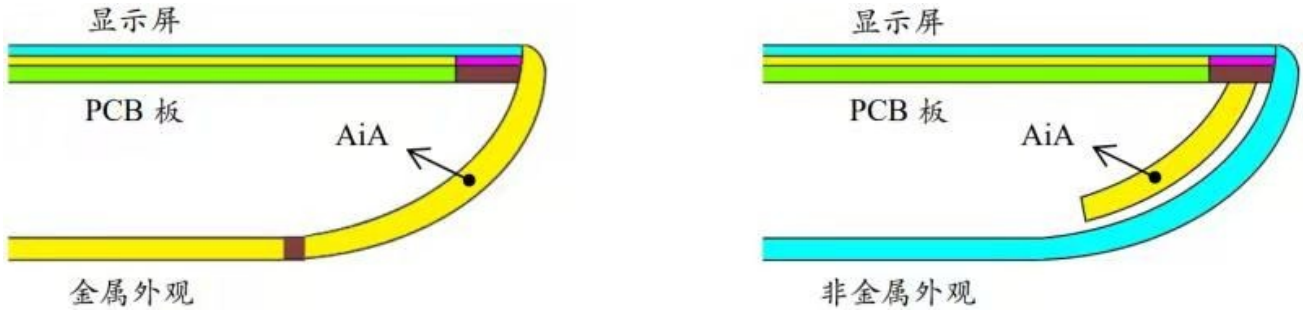


图 2-6 AiA之外观共形示意图 [13]

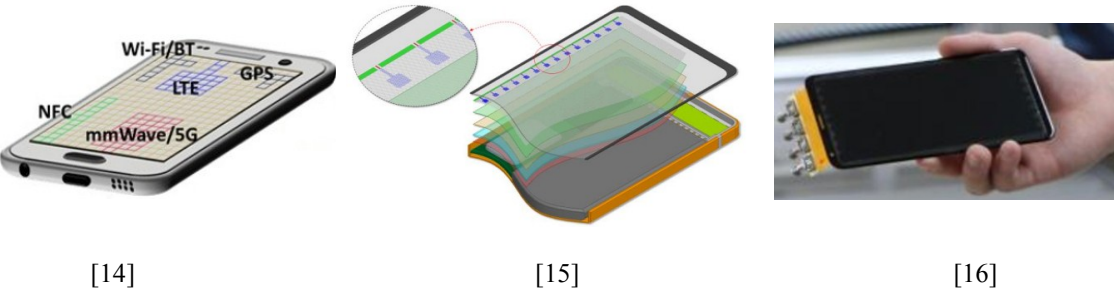


图2-7 AoD方案之示意图 [14], [15] 与28-GHz AoD样机 [16]

### 3 基站天线

大规模MIMO 技术是新一代移动通信的核心技术。大规模 MIMO 系统在基站端使用了大规模天线阵列，通过利用分集和空间复用的思想，可以在不增加频谱资源和功率的情况下，提供巨大的阵列增益、分集增益和复用增益，并且成倍地提高系统的频谱利用率，实现系统容量的数量级增长。大规模MIMO天线阵作为关键支撑技术近年来受到了广泛研究。

2016 年D. Manteuffel 等人提出一种室内MIMO基站天线阵[17]，如图 3-1 所示。借助特征模理论，通过对同一个贴片用不同的馈电端口可激励起不同频段的本征电流，实现宽带特性。另外控制开缝以及调节缝的大小和位置，可以进一步调节匹配。最后设计了 484 个端口的  $11 \times 11$  个天线单元组成的大规模 MIMO 阵列，与传统的交叉偶极子相比，可以实现尺寸 54% 的缩减。天线工作在6-8.5 GHz 的频带内，各天线端口间的隔离度为20 dB。

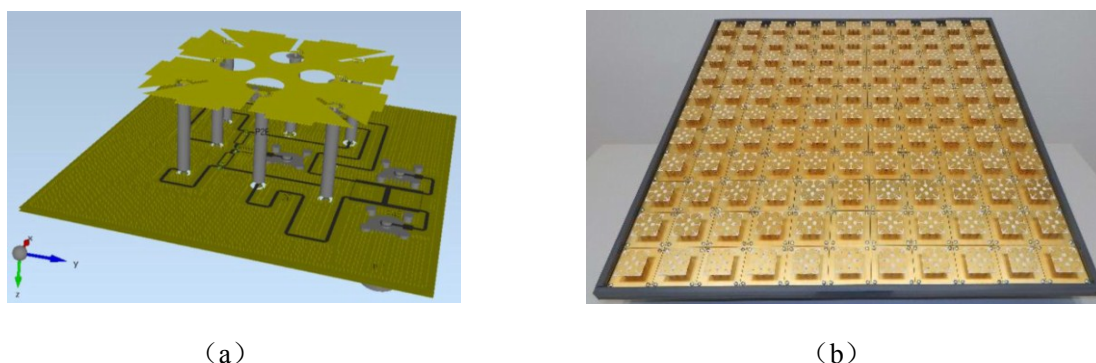


图3-1  $11 \times 11$ 个单元的大规模MIMO基站天线阵：（a）天线单元；（b）MIMO阵列

2016 年Y. Gao 等学者提出了一个双极化MIMO天线阵列[18]（如图3-2），它有144个端口，可以在3.7GHz的频率下工作。该阵列由18个低剖面子阵列组成。每个子阵由四个单元组成。每个天线单元由一个垂直极化端口和一个水平极化端口组成，它们连接到功率分配器，作为馈电网络。天线单元采用堆叠式贴片设计，阵列整体呈现三层台阶结构，相邻台阶夹角为20度，最终天线端口之间可提供25dB的隔离度。

另外瑞典Lund大学开发了基于100个天线单元的LuMaMi原型机 [19]（如图3-3所示），中国无线移动国家重点实验室开发了128天线单元的大规模MIMO系统样机[20]。除此之外，还有美国莱斯大学的Argos原型机、三星毫米波大规模天线原型机、欧洲电信研究院Open Air Interface大规模MIMO系统原型机、英国布里斯托大学的原型机等等。

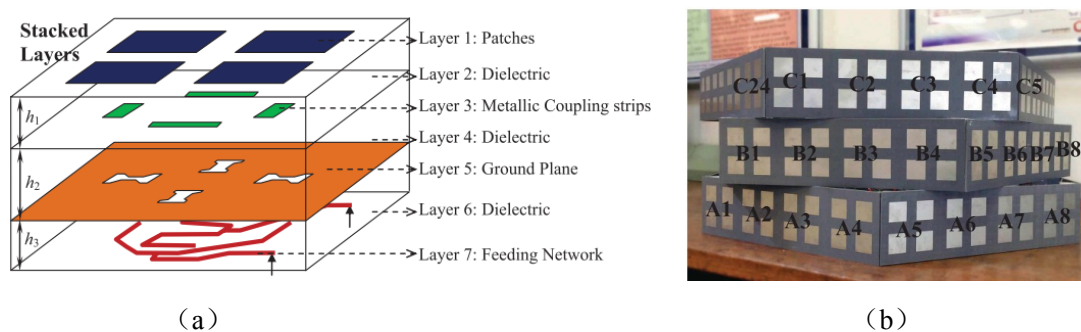


图3-2 144个端口的双极化MIMO基站天线阵[18]: (a) 双极化天线; (b) MIMO阵列

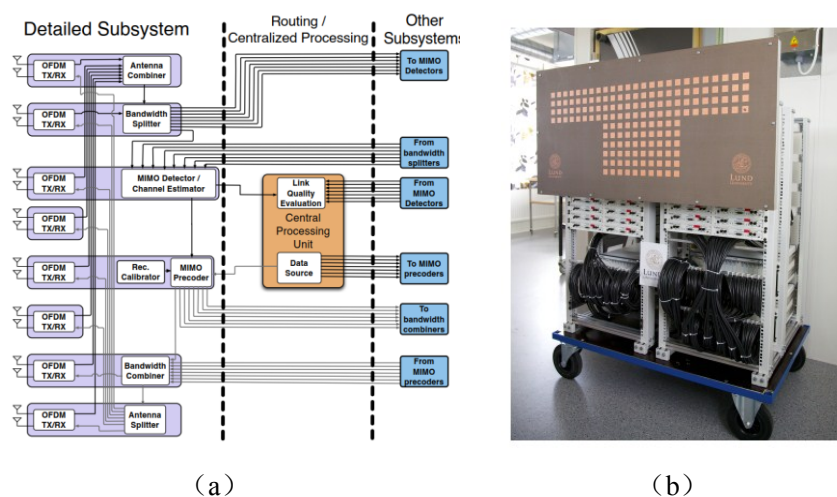


图3-3 瑞典Lund大学的LuMaMi原型机: (a) 系统架构; (b) 原型机

虽然大规模 MIMO 天线阵能够给通信系统带来很多优势,但是由于要配备成百上千根天线,大规模MIMO 系统增加了信道矩阵的维度,提高了信道估计和预编码的计算复杂度,带来无法估计的硬件实施成本和能量损耗问题,因此需要对大规模 MIMO 天线阵及其系统进行进一步的研究。

## 4 毫米波天线阵

毫米波已作为5G通信的候选频谱写进了标准协议，在6G通信中也必将发挥更大的作用。尽管毫米波具有大带宽的优势，但由于其工作波长较短，会造成更大的传输损耗、更短的传输距离等天然劣势。为了克服这一缺点，毫米波天线多采用阵列技术提高增益以增强覆盖能力。

文献[21]提出了一种用于E波段回传应用的宽带高增益平面天线阵（如图4-1所示）。天线单元由基片集成波导（SIW）背腔贴片和阶梯波导喇叭组成，采用SIW背腔贴片作为馈源和阻抗变换器，激励上层阶梯波导喇叭。制作了 $16 \times 16$ 单元的样机并进行了测试。实验结果表明，该天线在71-88.5GHz范围内具有22.4%的-10dB阻抗带宽和28.8~30.9dbi的峰值增益。

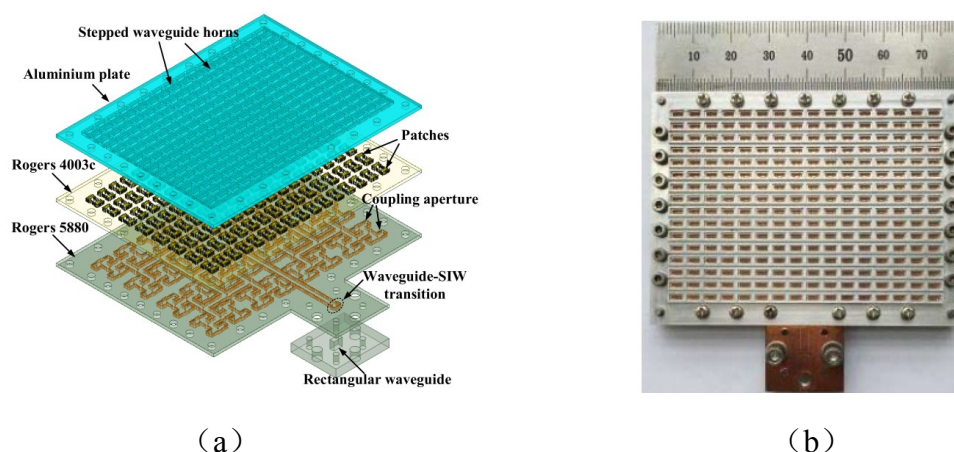


图4-1 E波段宽带高增益平面天线阵[21] (a) 天线阵结构； (b) 实物加工图

文献[22]设计了一种双波段共享孔径可变倾角连续横向短柱天线（如图4-2），工作于K波段和Ka波段的移动卫星通信频段，具有良好的端口隔离性和低剖面性能。其创新性在于共享辐射孔径和独立馈电网络，即两个馈电网络集成，共享一个辐射孔径。在两个工作频带的中心频率（19.8GHz和29.2GHz）下，波束扫描覆盖率分别为 $38^\circ \times 2$ 和 $60^\circ \times 2$ ，K波段和Ka波段的相对带宽分别为3.0%和2.7%，最大增益分别为24.33dBi和28.52dbi。该方案为K波段和Ka波段移动卫星通信提供了低成本天线方案。



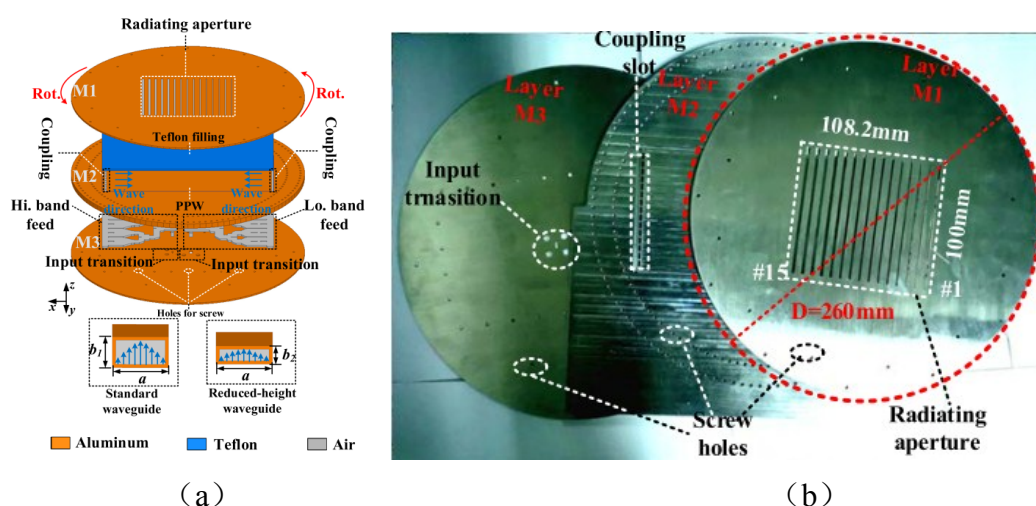


图4-2 高增益二维多波束天线阵阵[22] (a) 天线阵结构; (b) 实物加工图

文献[23]介绍了一款94GHz芯片集成波导(SIW)平行板长缝阵列天线(如图4-3),它能够从单个辐射孔产生双圆极化(CP)低副瓣电平(SLL)波束。这种天线由两层SIW基片组成,分别用于构造不等长馈电网络以及构造 $15 \times 15$ 共享孔径平行板缝隙阵列天线。与单层结构相比,这种多层拓扑结构具有更小的尺寸。利用两个一维16路不等功分器抑制CP阵列两个平面上的SLL,然后在馈电网络中使用 $90^\circ$ 耦合器,最终在左手圆极化(LHCP)和右手圆极化(RHCP)之间切换工作模式。

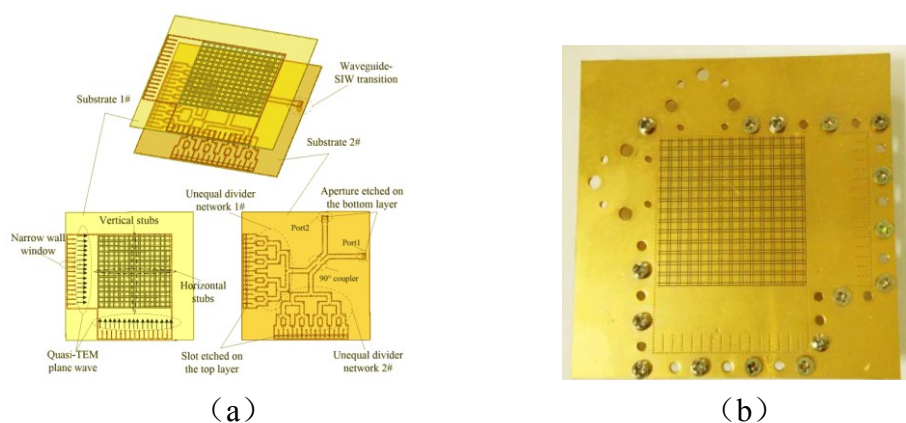


图4-3 高增益二维多波束天线阵阵[23] (a) 天线阵结构; (b) 实物加工图

文献[24]基于喇叭透镜和定频漏波天线提出了一种高增益二维扫描多波束阵列天线(如图4-4)。该阵列天线对喇叭透镜的结构和性能进行了改进,提出了一种新的相位补偿方法,可有效减少喇叭透镜的扫描增益损失。另外结合可重构技术,提出了可编码的定频漏波天线。通过级联修正型喇叭透镜和基片集成定频漏波天线,最终设计实现了一款 $7 \times 5$ 个单元数的高增益二

维扫描多波束阵列天线。该天线阵可以在二维平面内产生35个波束，在10GHz 时的增益为18.62~22.14dBi。与使用传统拓扑的二维扫描多波束天线相比，本设计具有更简单的结构，具有更高的增益。

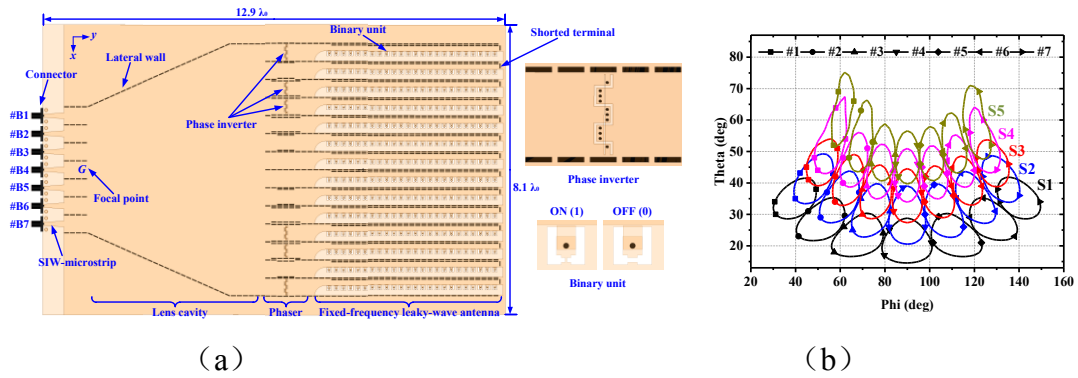


图4-4 高增益二维多波束天线阵阵[24] (a) 天线阵结构； (b) 半功率波束方向图

## 5 THz 天线

太赫兹技术作为是未来移动通信中重要的候选技术之一，在提升通信速率方面具有无可比拟的优势，但也存在一些限制。根据自由空间传播损耗公式，随着频率的升高，电磁波传播损耗会大幅增加，同时太赫兹波在大气中存在分子吸收损耗，水分子影响尤其显著，这导致了太赫兹传播具备高损耗的特点。因此，太赫兹通信系统往往需要采用定向天线和超大规模天线阵列来获得高增益。

相比传统微波频段，太赫兹频段对天线的结构工艺要求更高。按照结构与工作机理划分，常见的太赫兹天线包括喇叭天线、贴片和缝隙天线、反射面天线、透镜天线等。其中，喇叭天线这类机械天线工艺相对比较成熟，能够产生良好的定向波束。喇叭天线通常既可以作为反射面天线和透镜天线的馈源，也可以用作直接辐射的独立天线使用，在许多太赫兹实验演示系统中得到了广泛的应用，但其立体结构不利于集成到电路中，且太赫兹频段天线尺寸进一步减小，增加了喇叭天线的制作工艺成本与难度。反射面天线和透镜天线是由馈源天线和具有聚焦功能的口径面构成，能够形成定向高增益波束。通常反射面天线更多应用于射电天文领域。文献[25]设计了一种可以提供波束控制能力的高增益反射面天线，可用于远距离大容量太赫兹无线通信。太赫兹频段波长短，介质基片尺寸相对较大，产生的表面波损耗严重，透镜天线因其具有聚焦波束能力可消除平面天线的表面波效应，能够有效降低能量损失，提高天线增益，因而成为太赫兹频段常用的天线形式[26]。

此外，光电导天线作为产生宽带太赫兹波的一个主要方法，已被广泛用于宽带脉冲和单频连续太赫兹波段信号的产生和检测，是太赫兹成像和光谱系统中的基础器件[27]。在新材料天线方面，碳纳米管天线和石墨烯天线同样是太赫兹天线领域的研究热点。理想碳纳米管可认为是由碳原子构成的二维石墨平面卷曲而成的圆柱体管状结构，当被电磁激发时，碳纳米管可以像一个小的偶极子天线一样在太赫兹频段辐射[28]。石墨烯的独特电性能（例如高电导率）使其非常适合支持极高频信号。特别是，石墨烯在THz频率支持表面等离子激元（SPP）波，SPP共振波长比自由空间波长小得多，便于实现灵活紧凑设计[29]。在THz频段采用石墨烯等离子纳米天线阵列，可在1平方毫米内嵌入上千个阵列单元[30]，在器件小型化及超大规模天线阵列设计方面具有独特的优势。

未来的太赫兹通信系统可能采用超大规模天线阵列，阵列结构的设计对太赫兹通信系统性能影响重大。阵列天线基于波的干涉和叠加，形成指向性波束抵抗传输损耗。与毫米波类似，考虑到复杂度、成本与性能，超大规模太赫兹天线阵列在波束赋形方面通常考虑采用数模混合

方式。太赫兹信道具有稀疏特性，经过合理设计，混合波束赋形可以达到与全数字波束赋形相当的性能。射频链路与天线阵子的连接方式可以分为全连接方式和部分连接方式[31]，如图5-1所示。全连接方式虽然可以获得更好的赋形增益，但存在插入损耗大、对馈电能力要求高的缺点，因此从功耗、能效以及实现复杂度等角度考虑，太赫兹通信系统不适合采用全连接方式。未来的THz系统在大规模天线阵列设计上更倾向于采用部分连接(AoSA)架构。

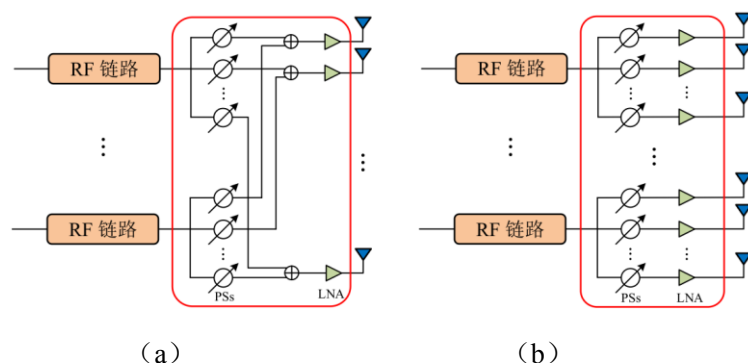


图5-1 THz系统架构: (a) 全连接架构; (b) 基于子阵的部分连接结构

太赫兹天线的设计相比于微波天线设计还存在诸多其他方面的挑战，例如微波天线可以独立设计后再连接到射频系统。而在太赫兹频段，为了进一步减小连接损耗，降低成本，需要考虑天线阵列和RF电路的集成设计，采用天线封装AiP以及片上天线AoC技术[32]。太赫兹频段支持超大带宽通信，同时考虑到大气传输时分子吸收形成的传输窗口，以及与低频段的共存问题，需要超宽带/多波段的的天线设计。总而言之，关于太赫兹天线，不论是工艺材料还是结构设计方面，还需要深入研究。

## 6 龙伯透镜天线

龙伯透镜天线最早由上世纪 40 年代的 S. K. Luneburg 提出，典型的龙伯透镜天线是一种球对称的介质透镜天线，其介电常数分布从内层到表面满足 2 到 1 的变化规律，其表面的每一个点都可以认为是焦点，只要在透镜表面安放多个馈源，就可以很容易在全空间形成多波束，而且每个波束增益相同。但由于低损耗介质制作工艺不成熟，导致龙伯透镜天线发展相对缓慢。

由于球形龙伯透镜天线安装相对复杂，因此结构更为简单的柱面龙伯透镜天线近年来受到了更多重视和研究。2013 年浙江大学吴锡东教授团队提出一种空气填充的柱面龙伯透镜天线 [33]，如图 8-1 所示，该天线根据 TE 波在平行板波导内的传播常数与波导高度相关，通过控制平行波导沿径向的高度来实现相应的传播常数。2013 年 Olivier Lafond 等人提出一种 60GHz 分层柱面龙伯透镜天线 [34]，如图 8-2 所示，该透镜天线的内部高介电常数层采用在高介电常数 Teflon 介质片上打孔等效来实现，外部低介电常数分层采用发泡技术来实现。结果表明该天线可以实现方位面内大角度的波束覆盖。

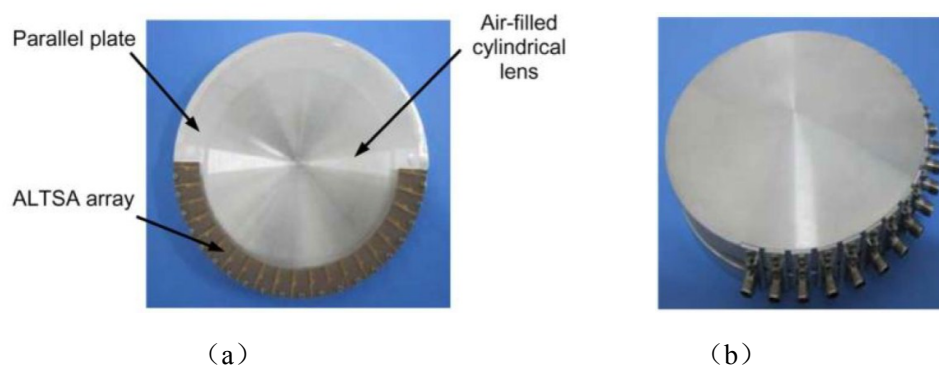


图6-1 空气填充的柱面龙伯透镜天线[33]。(a)内部俯视图；(b)侧视图

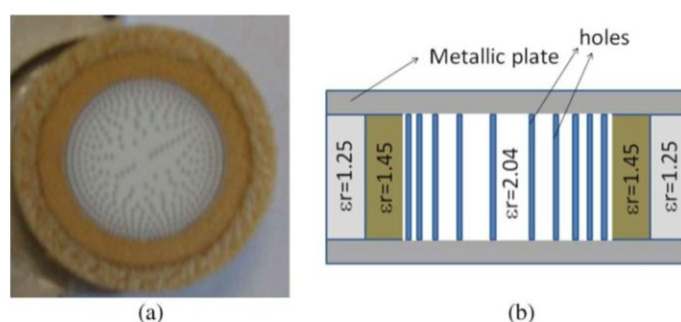


图6-2 60GHz 的分层柱面龙伯透镜天线[34]。(a)俯视图；(b)侧视图



电子科技大学杨仕文教授团队近年来开展了柱面龙伯透镜天线的系统研究，指导张哲从解析解的理论与分层介质的分析出发，基于并矢格林函数理论，推导了柱面龙伯透镜天线理想模型的解析解[35]，并将其与等效原理和口径场法相结合，最后将其应用到60GHz频段极扁平柱面龙伯透镜天线的快速分析和设计中（如图8-3所示），测试所得该透镜天线于60GHz下的增益约为17 dBi。

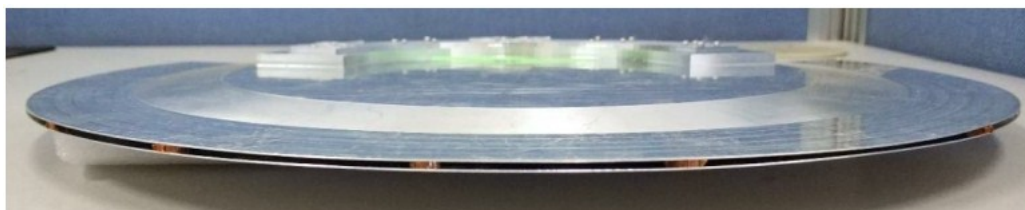


图6-3 极扁平柱面龙伯透镜天线[35]

除了龙伯透镜天线外，还有Rotman透镜天线、喇叭透镜天线、以及超材料/超表面透镜天线等，但只有龙伯透镜天线在覆盖空域内能够展现出完美的扫描波束而具有比较优势。随着低损耗介质以及加工工艺的进步，龙伯透镜天线的研究与应用必将更进一步。

## 7 智能反射面

5G网络已经可以实现1000倍网络容量的增加和1000亿设备的实时连接，这些功能的实现离不开超密集网络（Ultra-Dense Network, UDN）关键技术的支持，例如大规模多输入多输出（massive MIMO），毫米波通信等。但这些新技术实现所需的高复杂度、硬件成本和较大能耗的关键问题仍尚未解决。因此，为将来的无线通信开发更灵活的硬件体系结构具有重要意义。下一代无线网络的研究需要寻找低成本，高频谱和能源效率的解决方案。另外，自从现代无线通信的应用开始以来，传播介质就被视为发射机和接收机之间的随机行为实体，由于所传输的无线电波与周围环境之间的不可控制的相互作用，接收信号的质量会变得更差[36]。虽然5G的物理层技术通常能够适应无线环境随时间空间的变化，但信号在传播过程中本质上是随机的，环境存在诸多不可控制的因素[37]。由于以上的原因，最近有很多工作讨论能否将人造超表面（metasurface）应用到现有的无线通信系统中去，并且已经有一些工作应用了超表面去解决能耗问题和控制通信传输环境。

超表面由亚波长金属或介电散射粒子的二维阵列组成，它可以通过不同的方式转换入射到它上面的电磁波。下面主要介绍基于可调节超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS，或者Intelligent Reflecting Surface, IRS）创建的智能无线环境，其主要思想是在无线通信环境中通过引入可调节超表面有效控制入射信号的波形，例如相位，幅度，频率和极化方式，无需复杂的编译码和射频处理操作，实现覆盖增强和能效提升。

文献[38]中提出了可调节超表面辅助的智能无线网络环境的几种常见场景，如图9-1所示。图9-1（a）中，用户位于信号无效区域中，在该区域中用户与其服务基站之间的直视路径被障碍物阻塞。在这种情况下，部署与基站和用户都具有直视路径连接的IRS可以使信号绕过障碍物，从而创建一条虚拟直视路径连接。这可以扩展易受室内阻塞影响的毫米波通信的覆盖范围。图9-1（b）中，使用IRS可以改善物理层的安全性。当从基站到窃听者的连接距离小于到合法用户（Legitimate user 1）的连接距离，或者当窃听者与合法用户（Legitimate user 2）位于同一方向时，会严重限制可达保密通信速率（即便后一种情况中基站会使用波束赋形）。但是，如果在窃听者附近部署IRS，则可以调整IRS的反射信号以抵消窃听者从基站接收到的信号，从而有效地减少信息泄漏。图9-1（c）中，在小区边缘部署IRS可以对相邻小区干扰进行抑制。小区边缘用户接收到本小区基站的信号很微弱，还会收到来自相邻小区基站的同信道干扰。IRS可以部署在小区边缘，经过设计的IRS不仅可以通过反射来增强所需信号的功率，还可以抵消干扰的功率，从而可以在其附近产生“信号热点”以及无干扰区域。图9-1（d）中，IRS可以应用

到大规模（D2D）的通信中。IRS充当信号反射集线器，通过干扰缓解来支持同时进行的低功率传输。图7-1（e）中，IRS可以实现物联网（IoT）网络中各种设备的同时无线信息和功率传输（Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT）[39]。其中IRS的大口径被用来补偿远距离的功率损耗，通过对附近的物联网设备进行无源波束赋形，来提升功率传输的效率。

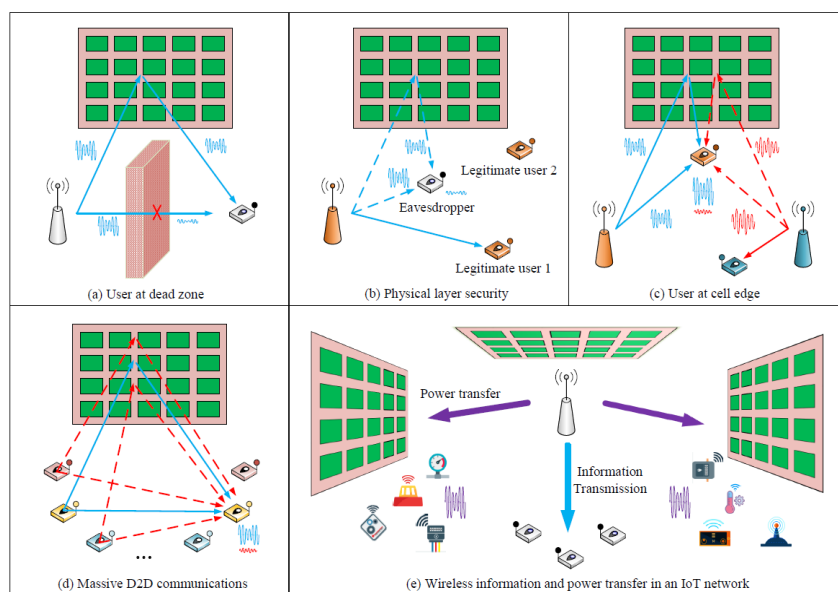


图 7-1 智能反射表面（IRS）在无线网络中的典型应用[38]

上述基于IRS的智能无线环境的工作原理是，可调节超表面上的每个反射元都能灵活控制反射信号相位和幅度等特性，所以对每个反射元进行不同的控制可以实现反射信号的波束赋形，从而实现覆盖的增强。使用超表面实现覆盖增强实质上是一种无源波束赋形。文献[39-41]分别对含有智能反射表面的无线通信系统进行了波束赋形的联合优化，分别采用不同的指标。其中文献[40]研究了联合无人机轨迹和智能反射表面的无源波束成形，其仿真结果表明，反射面有利于大幅提高支持UAV的网络的通信质量。文献[41]中优化了每个用户的发射功率以及表面元素的值，使系统的能量效率的最大化。仿真结果表明，与传统的中继辅助通信相比，IRS辅助通信可以显著提高能效。

文献[36]中特别指出了今后使用IRS改善无线环境的研究方向，讨论了如何使用IRS来重新思考、分析和设计无线网络。比如需要建立信息与传播理论模型，如何估算优化所需的信道并将这些信息反馈给发射机，IRS与新兴技术的集成问题，等等。



## 8 轨道角动量天线阵

提高系统的频谱资源利用率一直都是发展移动通信技术的主要目标。移动通信蜂窝网的系统架构为复用技术提供了广阔舞台，从频分复用、时分复用、码分复用到空分复用等技术，在时域、空域或者码域内划分不同的子信道，一定程度上提高了信道传输效率，但在不拓宽频谱带宽的前提下对于频谱资源利用率的提升仍旧有限。近些年学术界研究的轨道角动量（Orbital Angular Momentum, OAM）电磁波凭借携带的多种OAM模为移动通信系统提供了一种新型信道复用技术。其OAM 模式数凭借自生的模式正交性可以实现以相同频率发射但不同 OAM 模式编码的独立的信道。如何产生蜗旋电磁波束是实现OAM通信的关键，也是当前研究的热点。

在微波频段利用圆形阵列天线是一种产生OAM 波束的常用方法，并作为各种 OAM 通信实验以及链路分析的基本模型。其中，圆环天线阵列将天线单元等间距分布在同一圆周上，利用阵元之间不同的馈电相位差即可实现不同模式 OAM 波束的产生。文献[42]提出利用贴片天线实现均匀圆环阵列的方案，通过不同的并联微带馈电网络激励8个矩形贴片，在 10GHz 频率处产生了两个模式的 OAM 波束，阵列结构如图5-1所示。另外文献[43]提出一种中心工作频率 5.8GHz的平面四臂等角螺旋多模 OAM 天线（如图5-2），以实现在不改变天线结构的前提下，通过具有等幅、不同相差的馈电方案对端口进行激励，天线能辐射携带不同模式数的 OAM 波束。但是阵列天线馈电网络复杂，产生的 OAM 波束发散角较大，而且产生的 OAM 模式受到阵元个数的限制。贴片天线和行波天线结构简单、易于加工和集成，但是增益低、波束发散角大。

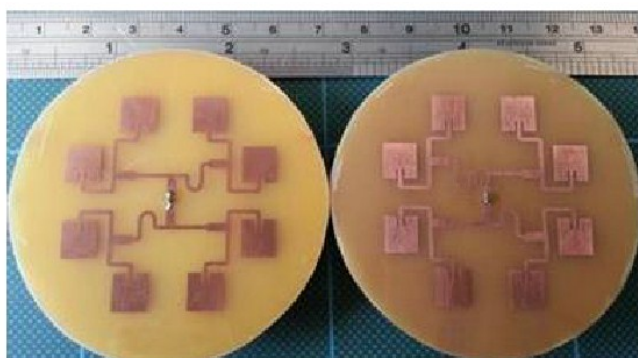


图8-1 圆环分布的矩形贴片天线阵列



图8-2 平面四臂等角螺旋天线

反射和透射阵列天线以及超表面天线由于可以改变阵面的相位分布实现波束赋形，用来产

生 OAM 波束也得到广泛的关注。2016 年, Bijun Xu 等人设计了一款反射型相位梯度超表面天线[44], 通过改变单元尺寸大小, 引入梯度相位, 产生了 OAM 波束, 其阵列天线结构如图 5-3所示。

石墨烯具有电可调性, 通过改变外加电压可以改变化学势, 影响石墨烯的电导率进而实现石墨烯超表面工作状态的动态调控, 因此可以实现 OAM 模式的可重构。2017年, 上海交通大学毛军发教授课题组设计了一款可重构石墨烯反射超表面天线[45], 改变石墨烯贴片大小和化学势, 实现了360°的相移范围, 产生了模式可重构的OAM 涡旋波束, 阵列天线结构如图5-4所示。但是这种天线结构加工复杂, 只停留在仿真阶段。

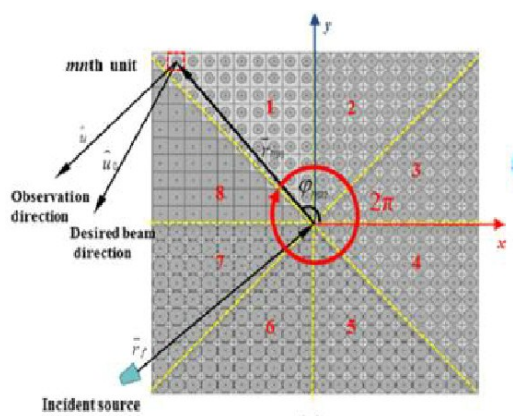


图8-3 相位梯度超表面

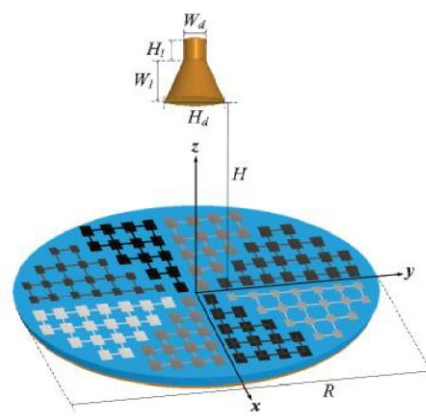


图8-4 可重构石墨烯阵列

除了上述OAM波束的产生方式以外, 还有其他很多OAM波束形成方法。随着6G通信研究的不断深入, 对多模、多频/宽带、多极化等OAM电磁波束的研究也将进入一个新的阶段。

## 9 液体天线

液态天线在近些年成为了一个新的研究方向,为无线电子设备与系统天线所遇到的问题提供了潜在的解决思路。液体天线就是用液体材料代替传统的固体材料,利用液体材料作为主要辐射媒介来进行信号的发射和接收。对于传统的固体天线,一旦结构设计好,就很难对其尺寸以及形状进行改变,从而其阻抗、极化以及辐射特性很难实时变化。而液态天线由于其流体特性,可在诸如频率、方向图、极化等方面易实现可重构。

水作为天线载体,可利用其高介电常数特性,实现天线的小型化设计,有效提高系统紧凑性。文献[46]通过使用水构造谐振器,提出了一种频率可重构的圆极化天线,如下图所示。这一天线由两部分组成:一是放置在底部的阿基米德螺旋缝隙天线,用以产生圆极化;二是加载在天线顶部的频率可重构辐射体,其由蒸馏水填充,且可以通过改变水的尺寸来改变这一辐射体的谐振频率。

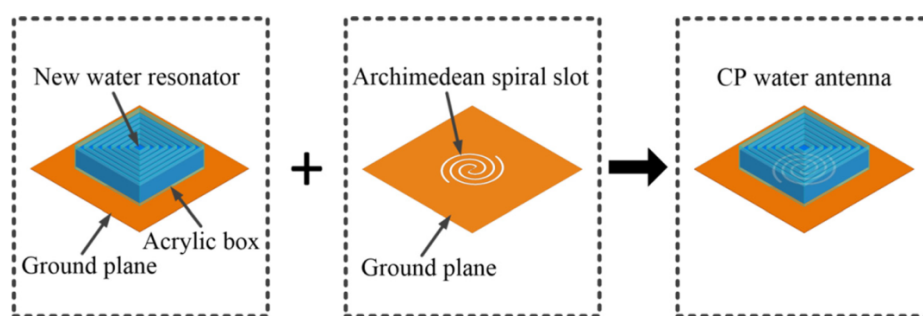


图9-1 基于水构造的频率可重构圆极化天线[46]

文献[47]提出了一种极化捷变单馈微带天线。在不同高度的方形贴片的四角加载蒸馏水瓶,改变谐振模的有效介电常数。通过对四个水柱高度的扰动,可以得到圆极化辐射。另外,通过控制水面高度,可以实现右旋圆极化、左旋圆极化和线极化的极化重构。

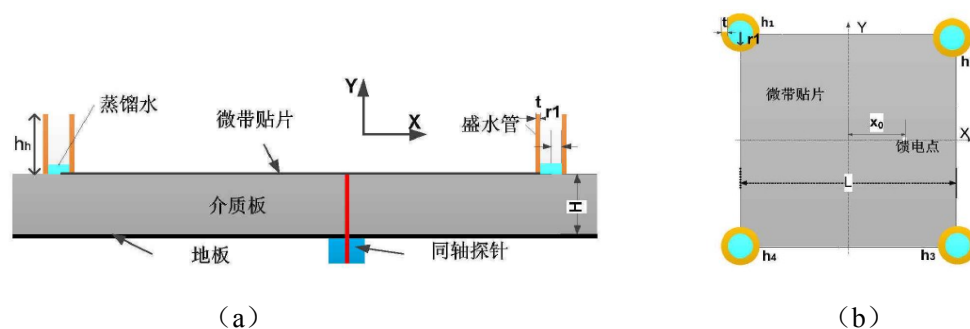


图9-2 基于水构造的极化可重构圆极化天线[47]: (a) 侧视图; (b) 俯视图

当前对液体天线的研究，主要是集中在对海水与蒸馏水的研究，对其他液体材料的研究很少。蒸馏水在微波高频段的介质损耗比较大，研究主要集中在 1 GHz 以内的频段，这限制了蒸馏水在高频段中的应用。如何设计适用于高频段无线通信的液体天线，还需要进一步的研究。

## 10 参考文献

- [1] L. Sun, Y. Li, Z. Zhang, and Z. Feng, "Wideband 5G MIMO antenna with integrated orthogonal-mode dual-antenna pairs for metal-rimmed smartphones," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 4, pp. 2494–2503, Apr. 2020.
- [2] K.-L. Wong and J.-Y. Lu, "3.6-GHz 10-antenna array for MIMO operation in the smartphone," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 57, no. 7, pp. 1699–1704, Jul. 2015.
- [3] M.-Y. Li, Y.-L. Ban, Z.-Q. Xu, et. al., "Tri-polarized 12-antenna MIMO array for future 5G smartphone applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6160–6170, Mar. 2018.
- [4] The third generation partnership project (3GPP), "TS 38.101-2", v. 16.4.0, Jun. 2020.
- [5] [Online]. Available: [https://www.sohu.com/a/427359882\\_115037](https://www.sohu.com/a/427359882_115037)
- [6] Y. P. Zhang, and J. Mao, "An overview of the development of antenna-in-package technology for highly integrated wireless devices," *IEEE Proc.*, vol. 107, no. 11, pp. 2265–2280, Nov. 2019.
- [7] W. Hong, K.-H. Baek, and S. Ko, "Millimeter-wave 5G antennas for smartphones: overview and experimental demonstration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6250–6261, Dec. 2017.
- [8] Qualcomm Inc. (2018). *QTM* [Online]. Available: [www.qualcomm.com/media/documents/files/qtm052-25pct-smaller.pdf](http://www.qualcomm.com/media/documents/files/qtm052-25pct-smaller.pdf)
- [9] J. Kurvinen, H. Kahkonen, A. Lehtovuori, et. al., "Co-designed mm-Wave and LTE handset antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 3, pp. 1545–1553, Mar. 2019.
- [10] B. Yu, K. Yang, C.-Y.-D. Sim, and G. Yang, "A novel 28 GHz beam steering array for 5G mobile device with metallic casing application," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 1, pp. 462–466, Jan. 2018.
- [11] H.-C. Huang, Y. Wang, and X. Jian, "Novel integrated design of dual-band dual-polarization mm-Wave antennas in non-mm-Wave antennas (AiA) for a 5G phone with a metal frame," *Int. Workshop Antenna Technol.*, Miami, USA, Mar. 2019, pp. 125–128.
- [12] Y. Wang, H.-C. Huang, and X. Jian, "Novel embedded design of dual-band dual-polarization mm-Wave antennas in non-mm-wave antennas integrating a package (AiAiP) for a 5G phone with a metal frame," *Eur. Microw. Conf. Central Eur.*, Prague, Czech, May 2019, pp. 415–418.
- [13] H.-C. Huang, "Evolution of millimeter-Wave antenna solutions and designs to cellular phones," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 187615–187622, Sep. 2020.
- [14] W. Hong, S. Ko, Y. G. Kim, and S. Lim, "Invisible antennas using mesoscale conductive polymer wires embedded within OLED displays," *Eur. Conf. Antennas Propag.*, Paris, France, Mar. 2017, pp. 2809–2811.
- [15] J. Park, S. Y. Lee, J. Kim, et. al., "An optically invisible antenna-on-display (AoD) concept for millimeter-wave 5G cellular devices," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 5, pp. 2942–2952, May 2019.
- [16] POSTECH (2019). *Getting to 5G smartphones with first antenna-on-display*. [Online]. Available: [www.powersystemsdesign.com/articles/getting-to-5g-smartphones-with-first-antenna-on-display/](http://www.powersystemsdesign.com/articles/getting-to-5g-smartphones-with-first-antenna-on-display/) 32/14418
- [17] D. Manteuffel, R. Martens. "Compact Multimode Multielement Antenna for Indoor UWB Massive MIMO". *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.64, no.7, pp.2689-2697, 2016



- [18] Y. Gao, R. Ma, Y. P Wang, et al. "Stacked Patch Antenna with Dual-Polarization and Low Mutual Coupling for Massive MIMO". *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.64, no.10, pp. 4544-4549, 2016
- [19] J. Vieira, S. Malkowsky, K. Nieman, et al., "A flexible 100-antenna testbed for Massive MIMO," *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin, TX, 2014, pp. 287-293.
- [20] Y. Song and X. Su, "A realistic algorithm design of 128-antenna prototype for massive MIMO," *2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*, Chengdu, 2016, pp. 1-6.
- [21] K. Fan, Z. C. Hao, Q. Yuan, et. al., "A Wideband High-Gain Planar Integrated Antenna Array for E-Band Backhaul Applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.68, no.3, pp.2138-2147, 2020
- [22] R. S. Hao, Y. J. Cheng, and Y. F. Wu, "Shared-Aperture Variable Inclination Continuous Transverse Stub Antenna Working at K – and Ka-Bands for Mobile Satellite Communication", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.68, no.9, pp.6656-6665, 2020
- [23] Y. J. Cheng, J. Wang, and X. L. Liu, "94 GHz Substrate Integrated Waveguide Dual-Circular-Polarization Shared-Aperture Parallel-Plate Long-Slot Array Antenna With Low Sidelobe Level", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.65, no.11, pp.58556-5861, 2017
- [24] J. W. Lian, H. Zhu, Y. L. Ban, et. al., "Uniplanar High-Gain 2-D Scanning Leaky-Wave Multibeam Array Antenna at Fixed Frequency", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.68, no.7, pp.5257-5268, 2020
- [25] C. Shu, S. Hu, Y. Yao and X. Chen, "High-gain reflector antenna with beam steering for terahertz wireless communications," *2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT)*, Liverpool, 2017, pp. 1-4.
- [26] Chattopadhyay, Goutam & Alonso-delPino, Maria & Chahat, Nacer & Gonzalez-Ovejero, David & Lee, Choonsup & Reck, T.. (2018). Terahertz Antennas and Feeds. 10.1007/978-3-319-62773-1\_10.
- [27] Nathan M. Burford, Magda O. El-Shenawee, "Review of terahertz photoconductive antenna technology," *Opt. Eng.* 56(1) 010901, 24 January 2017.
- [28] Jurn, Yaseen, MohamedFareq AbdulMalek, and Hasliza Rahim. "Carbon nanotubes composite materials for dipole antennas at terahertz range." 2018: 11.
- [29] Singh, Arjun, et al. "Design and operation of a Graphene-based Plasmonic nano-antenna array for communication in the Terahertz band." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* , vol.38, no.9, pp.2104-2117, 2020
- [30] I. F. Akyildiz and J. M. Jornet, "Realizing Ultra - Massive MIMO (1024x1024) Communication in the (0.06 - 10) Terahertz Band," *Nano Communication Networks (Elsevier) Journal*, vol. 8, pp. 46–54, 2016.
- [31] C. Lin and G. Y. Li, "Terahertz communications: An array-of-subarrays solution," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, pp. 124–131, Dec. 2016.
- [32] Y. Zhang and J. Mao, "An Overview of the Development of Antenna-in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 11, pp. 2265-2280, Nov. 2019.
- [33] C. Hua, X. Wu, N. Yang, et al. "Air-filled parallel-plate cylindrical modified Luneberg lens antenna for multiple-beam scanning at millimeter-wave frequencies". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.61, no.1, pp.436-443, 2013.

- [34] O. Lafond, M. Himdi, H. Merlet, et al. "An active reconfigurable antenna at 60 GHz based on plate inhomogeneous lens and feeders". *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.61, no.4, pp.1672-1678, 2013.
- [35] Z. Zhang, S. Yang, Y. Chen, et al. "Fast Analysis of Parallel-Plate Cylindrical Luneberg Lens Antennas Through Dyadic Green's Functions". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.99, pp.1-11, 2018
- [36] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, et. al., "Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753-116773, 2019.
- [37] M. Di Renzo et al., "Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, p. 129, May 2019.
- [38] Q. Wu and R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network," *IEEE Commun. Mag.*, to appear. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.00152>
- [39] H. Guo, Y.-C. Liang, J. Chen, and E. G. Larsson, "Weighted sum-rate optimization for intelligent reflecting surface enhanced wireless networks," [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.07920>
- [40] S. Li, B. Duo, X. Yuan, Y.-C. Liang, and M. D. Renzo, "Reconfigurable intelligent surface assisted UAV communication: Joint trajectory design and passive beamforming" [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1908.04082>
- [41] C. Huang, G. C. Alexandropoulos, A. Zappone, et. al., "Energy Efficient Multi-User MISO Communication Using Low Resolution Large Intelligent Surfaces," *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6.
- [42] Q. Bai, A. Tennant, B. Allen. "Experimental circular phased array for generating OAM radio beams". *Electronics Letters*, vol.50, no.20: pp.1414-1415, 2014
- [43] Z. Q. Yi, H. Y. Tang, S. Tian, et al. "Multimode orbital angular momentum antenna based on four-arm planar spira". *Electronics Letters*, vol.55, no.16, pp.875-876, 2019
- [44] B. Xu, C. Wu, Z. Wei, et al. "Generating an orbital-angular-momentum beam with a metasurface of gradient reflective phase". *Optical Materials Express*, vol., 6, no.12, 3940, 2016
- [45] Z. Chang, B. You, L. Wu, et. al.. "A Reconfigurable Graphene Reflectarray for Generation of Vortex THz Waves". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.15, pp. 1537-1540, 2016
- [46] M. Zou, Z. Shen, and J. Pan, "Frequency-reconfigurable water antenna of circular polarization". *Applied Physics Letters*, 108(1), 014102. 2016
- [47] Y. H. Qian and Q. X. Chu, "A Polarization-Reconfigurable ater-Loaded Microstrip Antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.16, pp. 2179 – 2182, 2017

## 致谢

感谢以下撰稿人对本白皮书所做出的出色工作。

主编：	班永灵、武刚（电子科技大学）
编委：	
睿德通讯	黄奂衢
东南大学	金石
浙江大学	钟财军
清华大学	戴凌龙
大唐移动	秦海超
vivo	姜大洁
中兴通讯	孟溪
上海诺基亚贝尔	杨大全
紫光展锐	王苗
北京三星通信研究院	孙程君
中国电信	林衡华

FuTURE FORUM is committed to cutting edge technologies study and applications. Controversies on some technical road-maps and methodologies may arise from time to time. FuTURE FORUM encourages open discussion and exchange of ideas at all levels. The White Paper released by FuTURE FORUM represents the opinions which were agreed upon by all participating organizations and were supported by the majority of FuTURE FORUM members. The opinions contained in the White Paper does not necessarily represent a unanimous agreement of all FuTURE FORUM members.

FuTURE FORUM welcomes all experts and scholars' active participation in follow-on working group meetings and workshops. we also highly appreciate your valuable contribution to the FuTURE White Paper series.







未来移动通信论坛  
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM