

终端友好6G技术



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM

目 录

1. 引言.....	2
2. 终端友好的场景和需求.....	2
3. 终端友好关键技术.....	3
3.1 卫星与地面融合技术与多频段融合技术支持终端的广域泛在接入..	3
3.1.1 卫星与地面融合技术支持终端的广域接入.....	3
3.1.2 多频段融合技术支持终端的泛在接入.....	9
3.2 终端原生组网支持终端灵活的接入.....	16
3.3 通感算融合扩展终端的服务能力.....	17
3.3.1 对业务与用户的感知能力.....	18
3.3.2 对网络与终端的感知能力.....	19
3.3.3 对算力的感知能力.....	21
3.4 cell free 技术支持终端 ‘0’ 感知的移动性体验.....	24
3.4.1 Cell free 技术.....	25
3.4.2 上行辅助的移动性增强.....	28
3.5 Backscatter 和近零功耗接收支持终端 ‘0’ 功率通信.....	29
3.5.1 Backscatter 通信技术.....	29
3.5.2 近零功耗接收机.....	36
3.5.3 无功放技术.....	40
3.6 新型多址接入支持终端的免调度传输和上行异步传输.....	42
3.6.1 NOMA 技术.....	43
3.6.2 非协调多址接入技术.....	44
3.7 AI 与通信结合提升终端用户体验.....	47
3.7.1 终端友好的基于 AI 的通信技术.....	47
3.7.2 终端友好的 AI 技术.....	50
3.7.3 基于无线 AI 技术的终端展望.....	52
4. 总结.....	53
5. 参考文献.....	54
6. 缩略语.....	55
7. 贡献人员.....	58

终端友好 6G 技术

1. 引言

2019 年 Oulu 大学举办的第一届 6G 大会拉开了 6G 全球研究的大幕。从目前各机构发布的 6G 白皮书来看，大多数观点认为 6G 愿景是数字孪生^[1]或者数字世界与物理世界的高度融合。欧盟的 Hexa-X 项目提出了 6G 将连接人类世界，数字世界和物理世界并助力三个世界的高效互动^[2]。IMT-2030（6G）推进组于 2021 年发布的《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》提出了“万物智联，数字孪生”的 6G 愿景^[3]。

在面向 6G 的物理数字融合世界中，终端将发挥重要作用。终端是构建数字世界的神经末梢，是物理世界与数字世界相互作用的媒介，并将提供物理与数字世界融合服务^[4]。终端的能力和水平影响其在物理世界触达的深度和广度，从而直接决定了数字化世界的水平和运作效率，直接影响用户体验。

本白皮书将从面向 6G 的终端应用场景和需求出发，介绍终端友好的 6G 关键技术。

2. 终端友好的场景和需求

面向 2030 年及以后，预计将有千亿的各类设备需要联网以满足不同场景的多样化需求。这些设备包括各类传感器（环境监测，工业制造，体域网等），水表电表等，各种智能家居的设备，可穿戴设备（手表，XR 眼镜等），手机等。在面向 6G 新场景和增强能力时，目前终端的诸多挑战（功耗、复杂度、覆盖、成本、体积等）会进一步加剧甚至产生新的挑战，成为制约 6G 发展的瓶颈。这些挑战或问题包括：

- ✓ 未来广域接入需求与当前终端覆盖性能受限的矛盾
- ✓ 面向全频段多制式的泛在接入需求对终端成本体积功耗的挑战
- ✓ 目前的组网和接入不够灵活与普适性不强的问题
- ✓ 目前的终端的感知能力和支持计算的能力有限的问题

- ✓ 小区重选或切换失败导致的终端业务不连续和体验下降的问题
- ✓ 电池和供电技术有待突破与终端‘0’功率通信需求之间的矛盾
- ✓ 海量小包传输与较高的调度开销之间的矛盾
- ✓ 小型化终端的 AI 能力受限问题,以及能否借助 AI 进一步提升终端性能的问题

上述挑战或问题导致终端在未来物理和数字融合世界中发挥作用时不够“友好”；所以急需研究终端友好 6G 技术，为终端减负，“把复杂留给网络，把简单留给用户”。从终端侧看，终端友好包括降低终端的功耗、成本和复杂度，支持终端多样性，扩展接入场景，提升上行效率（能效、谱效），提升用户体验；甚至是终端放松某一点的体验，从而带来其他点的更好的体验。从网络侧看，终端友好旨在提升网络能力，以简化终端的相关流程和技术复杂度。

本白皮书涉及的终端友好的具体技术方向包括：

- ✓ 卫星与地面融合技术与多频段融合技术支持终端的广域泛在接入
- ✓ 终端原生组网支持终端灵活的接入
- ✓ 通感算融合扩展终端的服务能力
- ✓ Cell free 技术支持终端 ‘0’感知的移动性体验
- ✓ Backscatter 和近零功耗接收机支持终端‘0’功率通信
- ✓ 新型多址接入支持终端的免调度传输和上行异步传输
- ✓ AI 与通信结合提升终端用户体验

3. 终端友好关键技术

3.1 卫星与地面融合技术与多频段融合技术支持终端的广域泛在接入

3.1.1 卫星与地面融合技术支持终端的广域接入

广域接入技术能够为终端和用户在广域范围内提供无线接入，实现随时随地连接网络。当前，地面蜂窝移动通信系统覆盖的人口数量已经超过 70%，但是由于技术和经济限制，只覆盖了 20%的陆地面积，6%的地球表面面积，远不能满足广域无缝接入的要求。卫星通信具有覆盖广、对基础设施依赖小等一系列突出

优势,为地面蜂窝系统解决地球剩余 94%面积的网络覆盖问题提供了一种低成本方式。地面蜂窝通信系统和高、中、低轨卫星通信系统融合发展,构建天地一体化通信系统,将极大地扩展终端的接入区域,可实现在全球范围内,任何人任何物在任何地点在任何时间无缝接入和泛在连接。在 6G 天地一体化系统中,卫星通信终端和地面蜂窝通信终端的有机融合是实现终端的广域无缝接入和泛在连接的关键。

相比地面蜂窝通信终端,目前,卫星通信终端在形态、功耗、通信速率、集成度、网络联通性等方面都不算友好。一方面是因为卫星通信传输距离远、大尺度衰落严重,当通信卫星是 GEO 同步卫星,且采用毫米波及以上频段时,路径损耗极大;另一方面是因为卫星通信领域标准化程度较低,系统之间缺乏标准化接口。

表 1 比较了典型的地面蜂窝通信终端和卫星通信终端,包括 5G 手机终端、天通一号卫星终端和亚太 6D 卫星终端。其中,天通一号卫星是我国首颗移动通信卫星,亚太 6D 卫星是我国最先进的 Ku 高通量卫星。

表 1. 卫星通信终端和地面通信终端的区别

项目	卫星通信终端			地面通信终端	
	天通卫星终端 (GEO, S 频段)	亚太卫星终端 (GEO 卫星, Ku 频段)		Sub 6G 终端	毫米波终端
形态	手持机	VSAT 站 (天线尺寸 0.6m~1.2m)	便携终端(天线尺寸 0.1m)	手持机	CPE
最大发射功率	33dBm	8W~16W (39dBm~42dBm)	1W (30dBm)	23dBm	23dBm

数据速率	1.2Kbps ~ 9.6Kbps	下行 80Mbps (带宽 50MHz); 上行 10Mbps (带宽 8MHz)	上行 7Kbps (带宽 200KHz)、 下行 37.5Kbps (带宽 500KHz)	以下行最大4层MIMO、下行最高256QAM调制、最大带宽100MHz、载波间隔30kHz计算: 对于 5ms 单周期帧结构, 单载波理论下行峰值速率为 1.745Gbps; 以上行最大1层 SIMO 传输、最大带宽 100MHz、载波间隔 30kHz 计算: 对于 5ms 单周期帧结构, 单载波理论上行峰值速率为 95Mbps (64QAM) 或 127Mbps (256QAM)	下行高于 4Gbps; 上行高于 340Mbps
标准	天通一号标准	下行: DVB-S2 上行: DVB-RCS		3GPP 5G NR (FR1)	3GPP 5G NR (FR2)
集成化程度	基带芯片 40nm 工艺	28nm 或 40nm		基带芯片 5nm	基带芯片 5nm
通信模式	双模 (LTE+卫星) /单模	单模		多模	多模
用户数	数十万	数万		据爱立信预估, 2021 年底全球 5G 用户数量预估将超过 5.8 亿	
注: 5G 手机终端指标来自于 CCSA 5G 终端行业标准《2018-2364T-YDT 3627-2019_5G 数字蜂窝移动通信网增强移动宽带终端设备技术要求 (第一阶段)》; 5G 毫米波 CPE 终端数据来自于中国信通院组织的在 MTNet 实验室进行的毫米波测试。					

表 1 中, 天通一号手持机同时支持卫星通信体制和 4G LTE 标准, 但仅仅是两颗芯片的简单集成, 在制式间切换、节省资源等方面都没有做任何优化。目前卫星通信终端和地面蜂窝通信终端难以深度融合的主要原因是两种通信体制差异太大, 而且卫星通信网络和地面蜂窝网络没有统一管理。

一方面, 空口传输技术的选择直接决定了通信终端芯片实现方案, 因此, 终

端要实现两种空口的有机融合、资源共享，首先需要针对不同的通信信道特性、不同的通信场景和资源限制情况，统一设计融合的空口传输技术。另一方面，卫星通信终端和地面通信终端的有机融合意味着终端能够随时随地通过卫星节点或地面基站接入网络，并实现无缝切换。为此，需要设计星地融合的网络架构，实现一种网络架构覆盖卫星接入网和地面接入网，采用统一的接入管理机制，并研究高效、实时的移动性管理技术。相比地面蜂窝通信系统，卫星通信传输距离远，大尺度衰落严重，尤其是当用户链路使用 Ku/Ka 等高频段时，路径损耗更大。在卫星通信载荷能力一定的情况下，增大终端天线尺寸提高终端 G/T 值是实现高速数据传输的有效手段。解决终端大规模相控阵低成本化的问题是星地融合高频段终端规模化应用的必要途径。

但是，卫星通信与地面蜂窝通信存在较大差异，二者的信道模型不同、传输环境不同。卫星通信星载资源有限、传输距离远、低轨卫星节点高速移动等特点给空口传输技术融合、网络架构融合、移动性管理融合等带来挑战。3GPP 立项的非地面网络(Non-terrestrial networks, NTN)项目致力于将卫星通信与 5G 融合，解决新空口(New Radio, NR)支持 NTN 的问题。3GPP NTN 标准化工作将为 6G 星地融合研究奠定基础。从终端友好的角度来看，6G 星地融合关键技术包括天地一体化柔性网络架构、6G 星地融合传输技术、低成本终端相控阵天线技术等。

1. 天地一体化柔性网络架构

当前，卫星网络和地面蜂窝网络的架构差异大。面向未来天地一体化场景，高、中、低轨卫星网络和地面蜂窝网络融合组网，采用统一的柔性网络架构，构建端到端服务化的网络，实现全局统一的接入服务和移动性管理服务，对简化终端流程、降低切换时延都有利。

基于微服务的天地一体化接入网是构建柔性网络的关键环节。通过容器等云原生技术，利用微服务理念对无线协议功能进行重构，将各层相似功能按照微服务的方式进行重新封装，去除冗余，实现无线接入网的服务化设计。接入网各微服务可以独立演进、弹性扩展。微服务化的接入网包括资源配置服务、重传控制

服务、加密解密服务、移动性管理服务、信号处理服务、网络接入服务等。在天地一体化接入网中，通过星地协同提供统一的接入服务，可支持用户终端智能选择卫星接入节点或地面接入节点进行接入，保证接入方式最优。从终端来看，采用统一的机制接入网络，意味着接入网络对终端是透明、不可见的，从而极大地简化了终端实现。

2. 6G 星地融合传输技术

从终端的角度，采用星地融合统一的空口传输技术，能有效简化终端的产品设计，扩大产业生态链。在保持技术体系一致性的基础上，通过空中接口参数和协议机制的软件可配置和适应性修改，即可满足不同的应用需求。

相比传统的地面蜂窝通信系统和卫星通信系统，天地一体化系统面临更加复杂的传输信道环境，传输时延、大尺度衰落、多普勒频偏、散射等特性差异很大。如何高效利用时、空、频、码、功率等多维资源，设计星地融合统一的空中接口传输技术，是 6G 技术迫切需要解决的问题。

星地传输路径损耗大、星上资源受限、链路时延长以及低轨卫星高速移动，对同步和接入设计都带来了很大挑战。为了有效降低处理时延、提高用户体验，需要研究鲁棒的定时同步和极简的随机接入方案。尤其是对于没有 GNSS 定位和时频预补偿能力的终端，需要设计更加稳健的上行物理随机接入信道以克服定时偏移和频率偏差。

载波调制方式是极为重要的基础传输技术，实质上决定了数据传输的方式、频谱利用率和时频同步方案等。多载波调制方式凭借其灵活性和性能优势，是未来通信发展的主要方向。6G 多载波调制技术需要充分考虑卫星通信和地面蜂窝通信在传输信道模型、链路余量、多普勒频偏、节点资源等特性的不同，将星地传输、宽带窄带、高低频都纳入统一框架，平衡频谱效率、载波灵活性和峰均比等指标。

6G 阶段，会面临从地面网人本位城市覆盖组网方式向物本位全球覆盖组网方式的逐渐转换。物联网，尤其是卫星物联网，将是 6G 重要的应用场景之一。

在频谱资源越发匮乏的情况下，随着连接数密度的快速增长，物联网首先要解决的是提供更多的接入资源。除此之外，卫星物联网还需要重点解决低轨卫星快速移动导致的信令风暴和能源消耗。非正交多址接入技术在提供更多连接数和无授权传输方面具有较大的优势。但是，在卫星通信中，存在同一波束下多个用户之间信道增益差异不显著、星上处理能力不足的问题，需要针对这些问题，研究新型非正交多址接入技术，优化码本设计和降低接收机算法。

3. 低成本终端相控阵天线技术

终端相控阵天线的成本与芯片工艺技术密切相关。目前，相控阵技术在毫米波段使用的射频芯片主流是基于 GaAs 工艺、GaN 工艺的射频芯片，随着基于硅工艺的芯片逐渐进入毫米波频段，CMOS 工艺、SiGe 工艺和 SOI 工艺的相控阵射频芯片相继投入应用。

虽然 GaAs 工艺、GaN 工艺射频芯片的发射效率和接收芯片噪声系数更为优良，但针对卫星通信终端这类民用市场而言，电性能指标一般的硅工艺芯片因其成本低、集成度高的特点而更具优势。硅基射频芯片目前采用的三种工艺优劣对比为：CMOS 工艺芯片具有最低成本和较差的性能指标，CMOS-SOI 工艺具有次低的成本，最好的发射效率，同时噪声系数较差，SiGe 工艺具有较高的成本，较好的噪声系数，发射效率适中。卫星通信应用中的天线口径较大，使用相控阵技术后，通道规模均在数千通道量级，因此通常选择 CMOS 工艺的射频芯片技术。

另外，硅基 CMOS 芯片的技术成熟度最好，可以利用目前的 65nm、45nm、28nm 工艺线，良品率很高，且生产线的产能巨大。同时，充分利用成熟的数字电路技术，除了可以将多个通道的接收、发射、移相衰减控制以及多个通道间的功分网络集成到一颗芯片内，还可以把串并转换电路、温控电路、功率检测电路、自检电路等数字控制部分一起集成，通过 RF SOC 封装，实现相控阵天线的高集成。因此，为了获得可大规模商用的低成本优势，硅基 CMOS 芯片技术目前国际卫星终端相控阵天线领域的主流技术。

面向未来大规模生产，以 CMOS 工艺为基础的终端低成本相控阵天线技术

还需要解决芯片效率低、功率小以及噪声系数较大等难题。由于硅材料的电子迁移率低，导致采用 CMOS 工艺的芯片效率很难做高，目前毫米波频段国际领先水平单管芯达到了 20% 的效率，与 GaAs 通常 40% 的效率仍有较大差距；功率很难做大，目前可以做到单管芯 50mW 的水平，与 GaAs 通常 5W 的输出功率差距较大；噪声系数很难做小，现阶段达到的 3dB，与 GaAs 通常的 1.5dB 仍有差距。

3.1.2 多频段融合技术支持终端的泛在接入

为了满足通信需求的多元化发展，无线通信技术持续演进，新型的传输技术、接入技术不断出现，通信频段不断扩展。无线通信系统呈现泛在化、协同化的特征，将逐步演化成为一个异构互联的融合网络，多种制式、多种频段的网络共存，形成多重立体覆盖，相互补充、协同工作。

从终端的角度看，这就意味着系统中将同时存在多种接入网络，为终端提供了多样化的接入手段。但是，为了避免干扰，不同接入网络往往采用不同的通信频段。此外，由于频谱资源管理的历史原因，同一接入网络也面临所分配的频段存在碎片化等问题。因此，终端需要支持多种通信制式和多种射频频段，才能接入不同网络。在未来 6G 时代，业务需求类型将更加细分，终端需要提供越来越多样化的接入能力，最优接入选择问题、多模多频有效融合问题以及提高终端频谱使用效率问题变得更加具有挑战性。

1. 终端射频前端模组技术

终端支持多模多频主要与基带芯片、射频芯片、射频前端三部分有关。相对于数字化的基带芯片和射频芯片，多模式多频段对射频前端带来的挑战更大。射频前端决定了终端可以支持的通信模式、接收信号强度、通话稳定性、发射功率等重要性能指标，直接影响终端用户体验。

射频前端由一系列模拟器件组成，包括开关（Switches）、功率放大器（PA）、低噪声放大器（LNA）、滤波器（Filter）/双工器（Duplexer）等。每种通信制式、每个频段需配置专门的滤波器或双工器，很难共用。一方面，随着终端支持频段数的增加，其器件数量将逐渐增加。另一方面，终端对尺寸的要求较高，尤其是

全球最重要的消费类终端要求既轻又薄，由于结构设计的要求，终端留给射频前端的 PCB 面积是无法增加的。此外，随着通信制式射频复杂度的提升，使用分立方案的调试效率迅速下降。在空间和时间上的双重约束下，射频前端器件朝模组化方向发展已经成为一大趋势，这样不仅可以降低体积和尺寸，同时也能够提升性能，提高调试效率，降低成本。

射频前端模组是以系统封装（SiP）的形式集成数个不同工艺的高性能器件，包括射频开关、低噪声放大器、滤波器、双工器、功率放大器等分立器件。射频前端模组面临的挑战之一主要来自于高性能滤波器。1.5GHz~3.0GHz 是移动通信的黄金频段。这段频率范围最大的特点就是“拥挤”和“干扰”。FDD LTE 频段 Band1/2/3/4、TDD LTE 频段 B34/39/40/41、TDS-CDMA 的全部商用频段都在这个范围内，甚至 GPS、Wi-Fi 2.4G、Bluetooth 等重要的非蜂窝网通信也都工作在这个范围。随着 5G 的到来，终端射频前端面临的频段越来越多，滤波器数量的需求达到几十只甚至上百只，使得射频前端的设计变得极为复杂。

另一方面，为了满足大带宽的要求，5G NR 拓展到了毫米波频段。未来，6G 时代还可能拓展到太赫兹频段。因此，终端支持的频段范围需要不断拓宽，从几百兆赫兹的低频段到几十 G 赫兹的毫米波频段、乃至太赫兹频段都需要支持。过高的频率和过宽的带宽，半导体晶体管的特性下降很快，很难做出高性能。带宽的增加导致实现滤波器带内平坦度指标越来越困难，实现最优滤波器需要基于声表波、声体波或 MEMS。同时，功率放大器的效率随着频率的提升而降低，实现最优功放效率需要 GaAs 或者 GaN。这些器件工艺互不兼容，射频前端要实现异质集成，把不同工艺的芯片转移到共同一个芯片衬底，面临材料失配、电互联、散热困难等系列挑战。

未来，终端射频前端需要持续的创新来满足 6G 的需求。

- （1）持续通过软件无线电的方式来适应多频多模的趋势，通过物理通道的软件化满足不断融合的射频制式以及技术。现在 WiFi 和蜂窝通信的射频基础内核越来越接近，呈一致化的发展趋势，软件无线电技术有助于硬件充分复用，提高效率、降低成本。

- (2) CMOS RFIC 集成度越来越高,不同工艺的 SiP 趋势也越来越明显, Chiplet (小颗粒) 技术给射频电路/系统的设计带来新的思路。未来的系统越来越复杂,IP 越来越多,需要大的协同创新,而 Chiplet 小芯片技术可以发挥不同材料/器件的优势,使射频通信系统更加灵活。
- (3) 射频电路的数字化特点越来越明显,可以利用数字化射频设计来弥补射频 CMOS 工艺(不排除其他工艺)本身的缺陷。
- (4) 未来射频通信系统要想满足未来通信需求,跨领域的协同合作,最优化设计、极致化各个领域的特长将是必然发展趋势。

2. 智能接入技术

未来,基于不同接入技术标准的无线网络将长期共存,包括传统地面蜂窝通信中的基站、终端直通(sidelink)、卫星通信、以及 WiFi 等,形成异构无线网络,为终端提供泛在的接入,以满足连续广域覆盖、热点高容量、高可靠低时延以及低功耗巨连接等不同应用场景的通信需求。在异构多重无线网络中,海量用户行为的随机性、业务需求的动态变化和网络特性的复杂性,使得接入控制是非常具有挑战性的。

随着 AI 技术在无线通信领域应用的不断拓展,人们逐渐认识到,人工智能技术,比如机器学习、深度学习等,提供了一种有效的方法来处理动态性高、复杂度明显的问题。AI 技术能够利用接入网络中的大量数据,并结合来自最终用户体验和最终用户行为特征的其他维度,使得接入控制更加精细化、准确化。基于 AI 的无线接入控制技术,将对终端侧业务 QoS 需求和网络负载、干扰及网络参数信息进行数据收集和分析,在不同用户的业务需求与不同网络特性间进行智能适配。首先充分进行网络信息和终端信息感知,依靠机器学习、深度学习等 AI 技术对数据进行深度挖掘,并提取用户级别、小区级别、网络级别等不同级别的相关知识模型,然后应用所获得的知识模型来驱动与接入控制功能相关的行为的决策。在异构网络接入控制的过程当中,由于网络的动态性导致了决策过程也必然是动态性的,主体和环境需要进行频繁交互、感知,从而智能化地协调终端和网络的决策行为。

当前，从终端的角度来看，无论是处于空闲态还是连接态，接入网络的选择策略都是由网络侧提供。虽然由网络侧进行接入控制可以在负载均衡、系统容量等方面获得更好的系统性能，但是却难以满足用户精细的业务需求和个性偏好。另一方面，多种接入技术在网络侧的融合程度差异较大，难以实现对终端接入控制的全局优化。未来，在通信感知一体化技术以及 AI 技术的支持下，发挥终端自主性，终端自主地完成网络感知，综合考虑多种无线接入技术的能力、网络覆盖情况、网络使用情况、网络参考接入策略、业务需求、资费和用户的偏好，选择最优的网络接入，将是一种提高用户体验的有效手段。

3. meta-cell

当前小区模型的问题是结构固化，meta-cell 作为新的小区模型（meta 可翻译为元，有“……之源”“……的本质”“……的抽象”，meta-cell 即元小区）对资源、服务和组网进行抽象，实现灵活可编排的全频段融合组网、用户和终端原生组网。

当前 5G 终端面临碎片化频谱的资源使用效率较低、链路覆盖受限等问题。根据行业内不完全统计，当前存在相当数量的窄带频谱，尤其是 FDD 频谱资源，将近 90% 的频谱资源的带宽不超过 30MHz，频谱的碎片化降低了终端的频谱资源使用效率。

对于终端而言，meta-cell 的多频段融合接入和连接技术实现了不同频段的协同与互补，可以满足高流量、低开销、低能耗、广覆盖的需求。Layer 2 的不同子层的连接点，传输信道与物理信道的连接点，以及基带处理与射频处理的连接点等多个节点都可以作为多频段融合的锚点。同时支持属于不同 RAT，不同运营商的频段的融合，这个过程可以分为不同阶段，例如，起初可以是相同 RAT，相同运营商的多频段融合，逐步演进为不同 RAT，不同运营商的多频段融合。meta-cell 多频段融合接入和连接的解决方案包括：

（1）多物理层处理融合的多频段融合接入和连接技术

对于终端，可实现接入的一个蜂窝小区对应多个频谱资源，可通过以下两种

方式实现：

第一种：一个基带处理模块对应多个射频处理模块，每个射频处理对应一个频谱资源，一个基带处理模块与对应的多个射频处理模块组成未来蜂窝小区的模型。其中，基带处理包括：高层的控制面处理，用户面处理，MAC层调度处理，物理层处理等，同时也包括：无线承载，逻辑信道，传输信道，物理信道的处理等；射频处理包括：滤波，频移，功放的处理等。统一的基带处理极大简化了基带的复杂度和资源开销，减少与基站交互的开销，储存资源的开销，计算资源的开销，和信令资源的开销。

第二种：一个传输信道对应多个物理信道，每个物理信道对应一个频谱资源（一个频段，或一个载波），这些频谱资源可以是频段间的也可以是频段内的。统一的传输信道以上的处理模块与多个物理信道以下的处理模块组成未来蜂窝小区的模型，多个物理信道聚合共同接收从一个传输信道下发的数据或共同向一个传输信道递交数据。

多射频处理融合的多频段融合接入和连接技术实现频段间和频段内不同频谱资源的融合，终端可以利用多频谱资源融合得到的大带宽上进行传输，提高流量。也可以根据覆盖情况灵活切换频谱资源，保证业务传输的覆盖。并且可以根据覆盖，频点，空口质量选择一个频谱资源（对应一个射频处理模块，或一个物理信道的集合，或一个随机接入信道）进行接入，降低接入时延。另外终端可以综合在各个载波上的能耗情况进行高效的终端能耗管理。相比与传统载波聚合（CA）方案，多射频处理融合的多频段融合接入和连接方案在终端看来仍是一个小区，至少是一个基带处理或一个传输信道以上的处理，极大的简化了终端对小区的处理和维护，包括：较少的功能或协议栈实体，较少的实体间信息交互，较少的网管维护对象等。该方案兼顾频谱资源的高效利用和基带模块的低成本处理。

（2）增强型载波聚合

载波聚合（CA）方案作为一种成熟的多频段融合技术，在一些场景下仍然具有很高的价值，单从频谱资源融合这个点上来讲，其难度和复杂度较低，便于

实现，另外载波聚合方案对于聚合的多个载波中的单个载波的处理灵活度更高，所以载波聚合方案依然是处理多频段融合的有效技术手段。不可否认，载波聚合方案存在一些有待提高的地方，包括：每个载波都有自己的高层信令和调度信令，虽然 CA 支持跨载波调度，但当聚合的载波数量很大时，调度信令依然会占用大量的频谱资源，造成频谱资源的使用率较低。在移动性管理方面，终端在小区切换的过程中需要进行辅载波添加/删除的处理，这样会增加业务的中断时延，影响用户体验，特别是对于时延敏感的业务，同时也会影响终端在整个切换过程中的平均流量。综上，在某些场景下，终端使用载波聚合仍然是一种较好的选择，例如对于特征差异较大的蜂窝小区，终端可以选用载波聚合，根据小区的特征或需求，定制不同的配置和策略。但要对载波聚合的处理进行优化或增强，包括信令开销和调度资源的整合压缩，减少重复信令对频谱资源的浪费。例如聚合调度，在一个载波上接收的调度信令来调度多个载波上的数据传输。另一方面，优化载波聚合的移动性管理，减化或删除类似辅载波添加/删除等操作，减少终端在小区切换过程中的业务中端时延，提高切换时的终端传输流量。

（3）多连接以及其增强

相比于 5G NR 的双连接（DC），未来 6G 终端支持更多的连接数，每个连接可以对应一个频段，一个载波，或一个频谱资源，不同的连接对应不同的频段，实现多频段融合。终端可以在利用多频谱资源融合得到的大带宽上进行传输，还可以根据覆盖，频点，空口质量选择一个频谱资源进行接入。同时可以优化终端的多连接的处理过程，减少处理开销。多连接不仅可以实现终端的多频段融合接入和连接，也可以对像 4G 这样的已有 RAT 进行兼容。这些连接可以是不同 RAT 的，也可以是不同运营商的，实现终端对不同 RAT 和不同运营商的兼容，有利于终端的平滑演进和多运营商复用。多连接技术仍然可以继续优化增强，解决类似载波聚合需要优化的问题，例如移动性管理的优化，兼顾性能、用户体验、复杂度等多方面的表现。

综上，在不同的节点实现对多频段进行融合，保证终端高流量的同时，也对终端频谱高效利用，减少终端的接入时延，降低终端处理复杂端，能耗管理等方

面做出重要贡献，另外也兼容不同 RAT 和运营商，有助于终端的平滑演进和资源共享。

（4）多频段融合的服务和资源解耦

在 6G 中，meta-cell 元小区默认支持服务和资源的解耦。如图 1 所示，当终端从源侧向目标侧移动时，虽然 L1 链路（载波/信道）发生了变化，但是 L2 传输服务（乃至上面的 L3 连接服务）可以保持连续服务，在 L2 的协议功能锚点不变的情况下，也不需要重置上下文信息或者重建立 RRC 连接。这样，可以最大程度的保证平滑的业务连续性。

具体的服务场景包括：

- TRP 间的资源和服务解耦：某 TRP 通过其他 TRP 的资源提供服务，例如某些 TRP 的系统信息由其他 TRP 发送，终端在上述多个 TRP 之间移动时，系统信息服务不中断；
- TRP 内的资源和服务解耦：TRP 包含多个资源，包括频域和空域（载波/天线端口），终端根据需求，进行载波切换/天线端口切换时，使用 L1 信令即可完成切换，给终端提供连续的服务。

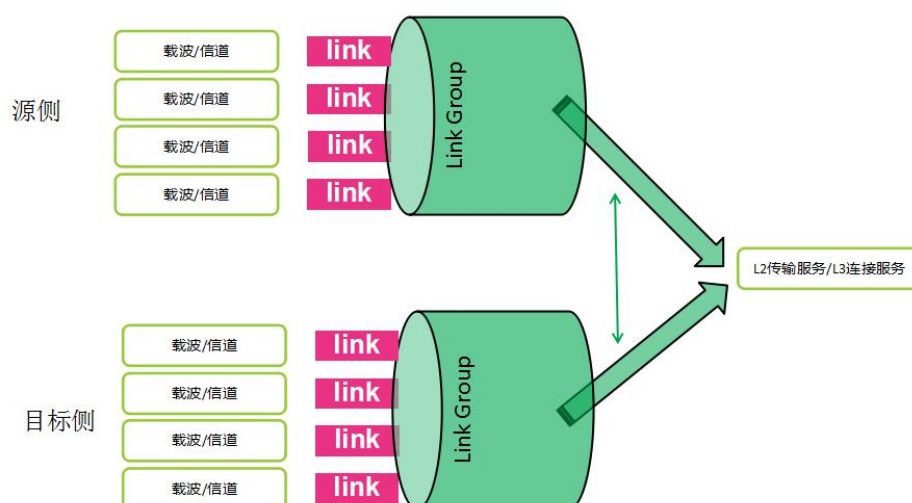


图 1. meta-cell 元小区支持服务和资源的解耦

3.2 终端原生组网支持终端灵活的接入

未来 6G 时代，用户终端在通感算智方面的业务体验和其个性化服务程度，将会获得更大的支撑和满足。6G 新网络不仅要能在信号、资源、功能和业务服务方面以用户为中心，更要能支撑新的架构和组网机制，去满足用户终端更自发性、主动化、定制化、隐私化和个性化的需求。

在传统 IMT 移动系统的单播体系中，每个用户通常都被看成是一个个独立的业务服务对象实体。每个用户通过随机接入、核心网鉴权、会话建立和无线接入网资源分配等环节，和网络各自建立彼此独立的通信连接。用户的逻辑功能地位明显低于网络侧（极为不对称不公平），处于相对被动且被服务的角色。随着未来 6G 用户地位的不断提升和各方面能力的不断增强（平权普惠），用户在 6G 新系统中的逻辑功能地位也将会不断地提升，逐渐从被动走向主动，从单纯地被服务走向同时提供服务的角色。

如图 2 所示，终端原生组网^[5]是指：若干终端能够在特定的签约限定条件下，通过本地方式先主动建立用户网络，之后该用户网络（即用户终端群）能够通过一个或多个主终端作为接口接入 6G 接入网，之后该用户网络中的各个终端能够直接或间接地和 6G 接入网之间进行通信。终端原生组网的主要形式有以下几种：终端之间组网（类 D2D 方式），单中心式（强弱终端搭配）和多中心式（对等终端或混合搭配）。原生 APP 可以对终端间组网进行编排，并和移动运营商（MO）域的功能协同，以构建立体组网。终端原生组网的优势是大幅提升空间自由度，支持 mesh 连接，UC-MIMO（用户协同 MIMO），提升空口 KPI（覆盖，吞吐量，确定性，定位精度），特别是终端协作通信还可以优化终端高频弱覆盖的问题。用户终端原生组网的应用场景包括某用户身上若干个可穿戴通信设备同时和 6G 网络连接，多个强业务关联的用户群同时和网络连接，若干任务协作的分布式通信设备同时和网络连接等。

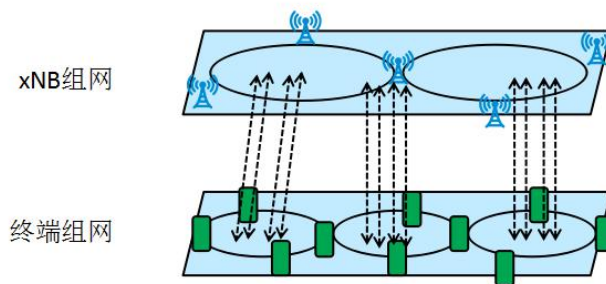


图 2. 终端原生的组网

3.3 通感算融合扩展终端的服务能力

感知、通信与计算融合是 6G 网络架构趋势特征，6G 网络将是通信网络、感知网络和算力网络融合的智能网络。6G 网络在提升通信能力的同时，将通过配置无线设备、传感器、数据和能力开放接口等多种手段，实现内生感知能力。网络感知在传统的终端能力感知（上报）、信道状态感知及业务服务质量/体验质量需求感知等方面，进一步向终端属性与状态感知、3D 信道环境感知、通信与算力状态感知、业务属性与状态感知扩展，为用户创造更加友好的网络与终端环境。

在感知能力与连接能力提升的基础上，网络将为终端提供泛在友好的算力服务支持。6G 网络可实时感知终端与网络连接状态、自身算力状态及终端算力需求，并为终端算力需求进行计算任务建模与分解，包括通信计算、数据计算和 AI 计算，从而为用户优化分配算力资源，保障基于算力与 AI 的业务体验。

另一方面，感知能力、计算能力和 AI 能力的提升，促进终端向智能体升级。智能体终端将配置各类传感器来感知信道等物理环境以及自身位置等状态，可提升与网络的交互能力，提供更多交互信息。这些信息可改善下行和上行的连接能力，例如波束成形与跟踪等方案优化，随机接入方案优化、多址接入方案优化和 HARQ 流程简化与优化，进一步提升终端服务能力和业务友好体验。

图 3 给出了终端友好的网络架构示意图。业务、网络与终端相互之间通过资源、数据、能力、状态信息开放与共享，组成用户友好环境。首先，感知、通信与计算一体化的网络能力作为服务开放给业务与终端，同时终端的各类能力与状态开放给网络与业务。业务状态与属性也开放给网络与终端，形成开放的友好生态。业务可以根据网络状态调整分发策略，网络也可以根据业务状态调整流量策

略，网络还可以根据终端状态调整业务与资源调度策略。

网络与终端能力的提升带来友好用户环境的同时，也带来系统复杂度的提升。终端友好的设想是将简单交给用户，将复杂度留给网络和系统。

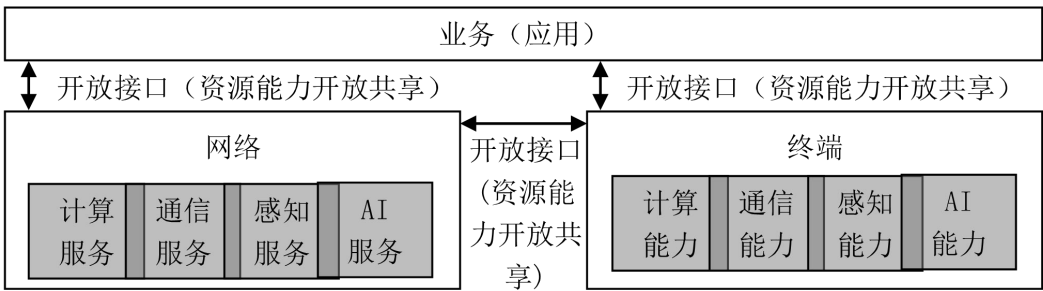


图 3. 业务、终端与网络友好环境

3.3.1 对业务与用户的感知能力

业务体验友好是终端友好的重要内涵。用户对终端提供的业务与应用的体验是否友好，取决于用户的主观感受。面向用户主观感受的业务体验质量（QoE）评估成为网络必备的支撑能力。在个人业务中，图像、视频、VR 甚至全息业务将是主流。这些业务的信息要素中，视觉信息占据主导位置。理论上，保证用户对视觉类业务的完美体验，需要做到无损采集、无损传输与无损显示。然而，达到客观的无损信息处理将会付出巨大的计算、通信与终端显示开销。幸运的是，当失真强度低于某一阈值，用户（人的视觉系统）便无法感知失真的存在，也就是说用户的体验达到了友好。这里，不可察觉失真的最大值定义为最小可觉失真（JND）。对 JND 建模，有两种途径，一种是大规模的用户体验调研，然后进行人工分析建模，但受限于用户高层认知偏差。二是采用脑电特征波（EEG）分析方法进行建模。EEG 作为一种中枢神经信号测量方法，能以极高的采样频率实时地测量大脑头皮电位波动，可以从复杂的脑神经活动中对用户视听感知和认知行为进行有效分析。不同图像质量等级可以激发不同形状、幅度的脑电信号曲线，即 EEG 特征。通过提取 EEG 特征并将其映射到分数上获得 EEG 分数，以此表征图像质量。因此，不同图像质量等级对应的 EEG 分数可以作为图像质量的评价指标，进而可以作为视频业务 QoE 的度量方法。为此，可在视频业务关注度、清晰度、流畅度（缓存、卡顿）、理性体验与感性体验各个维度建立评测标准。

具备用户对业务的主观体验质量评测与监测能力，成为网络对业务与用户感知能力的重要组成部分。当然，业务 QoE 会受到用户状态和环境条件等诸多随机因素影响，用户评价的多样性对业务 QoE 的估计误差也有显著影响。由于终端是距离用户最近的业务载体，这就需要挖掘终端的感知能力，开发个性化的体验质量估计模型，对业务 QoE 进行更精细的监测，从而保障终端的友好性。

进一步，基于用户与业务的感知及特性分析，网络还将具备业务的语义分析能力，基于业务的语义质量分析，进行语义压缩通信，提升传输效率。这就涉及到业务的语义表征问题。基于业务内容的稀疏性，压缩感知以低于奈奎斯特采样频率将原始的稀疏表征向量投影到低维空间，利用该低维观测向量实现原始数据的精确重构。另外，特定场景的图像影像存在高度的不变性和丰富的先验知识，学习这些语义与自然图像的映射关系，能够极大地提高语义表征能力。

目前机器学习中的很多新技术，例如对抗生成网络、全卷积网络等都可以用来进行语义表征建模。语义表征可以解决业务内容压缩与传输问题，在保障 QoE 的同时减轻终端负载。

3.3.2 对网络与终端的感知能力

6G 网络具有对自身状态和终端属性与状态的感知能力，包括网络吞吐量、谱效、能效、网络时延、网络容量、网络可靠性、传输速率、上行/下行传输速率、网络覆盖、小区切换成功率、网络干扰、无线资源、缓存资源等网络状态信息，还有终端 ID、型号、功耗、剩余电量、位置、发送/接收速率、信号质量、误比特率、天线数、计算能力、缓存空间、待连接数、安装的 APP 数量等终端状态信息，以及室内/室外、移动性、天气、周边建筑物和植被等环境状态信息。这些信息既可以作为业务内容提供给终端业务，也可以作为业务的优化参考信息，用来优化业务体验。

网络（接入节点）配置光学、无线电、红外、有线等各类传感器，多维深度感知网络环境和终端环境。基于感知数据与统计，建立无线信道质量地图和业务体验质量地图。一方面，网络基于用户特性、信道特性与业务特性统计信息，基于终端位置信息和无线信道质量地图及业务体验质量地图，采用无线资源预留、

波束跟踪与切换、内容缓存、内容语义压缩等多种手段进行业务质量波动预测与调控，保障用户业务体验。另一方面，基于用户行为、业务和网络特性，简化终端接入流程，例如随机接入流程和移动性管理流程等。网络可以针对快速移动终端建立航迹图谱，结合信道质量地图简化优化移动性管理中的信道重测、连接重配等流程，还可以简化优化波束成形方案与资源分配，在质量好的环境下快速缓存内容，在质量差的环境减少无线传输。

网络感知能力还可以实现与终端的无线通信，在终端通信不可靠或失效或不具备通信条件下，与终端交互信息。基于无线感知的通信关键在于回波调控技术。回波调控可以采用反向散射通信、智能超表面技术、二维码技术以及动态几何编码技术等。进一步，网络配置无线感知信号，可以进一步辅助终端执行本地感知，包括终端自身定位、测速，以支撑更丰富的终端应用。

在终端增加检测模块，还可以实现基于网络无线信号的无线感知。利用无线信号在动态环境中的变化特征，终端可以在特定场景中实现对环境与目标的感知功能，例如入侵检测、人体行为检测、天气检测以及周边异常检测等。这些功能将进一步丰富终端的应用。

基于终端与网络的连接能力，可以实现终端的感知任务卸载。由于网络（接入点）具有更多维度更高精度的感知能力，网络可以为终端执行感知盲区和感知能力外的感知任务，从而减轻终端感知负担，进而支持“零感知”终端应用，弱感知终端应用。同时通过网络，还可以实现终端的感知资源与能力共享。

3.3.3 对算力的感知能力

算力服务化是为了满足新型业务对算力的实时性、异构化、轻量化、动态化的需求而产生的技术与服务趋势。算力感知网络具有网络与计算深度融合的算力服务化架构，能够通过网络算力间深度的连接，将网络中无处不在的计算资源进行灵活调度，从而实现算力服务的自动化部署。通过算力感知、终端用户服务感知以及算力路由规划，能够实现按需调度调整网络中的算力，实现网络对用户动态需求高度契合，提高网络和计算资源的利用率，进一步提高网络的服务质量。而用户只需要在终端进行简单操作，网络便根据用户需求实现灵活调整，将复杂度留给网络，从而实现终端友好的目的。算力感知网络架构如图 4 所示，分为算网资源层、算力路由层和算力服务层^[6]。

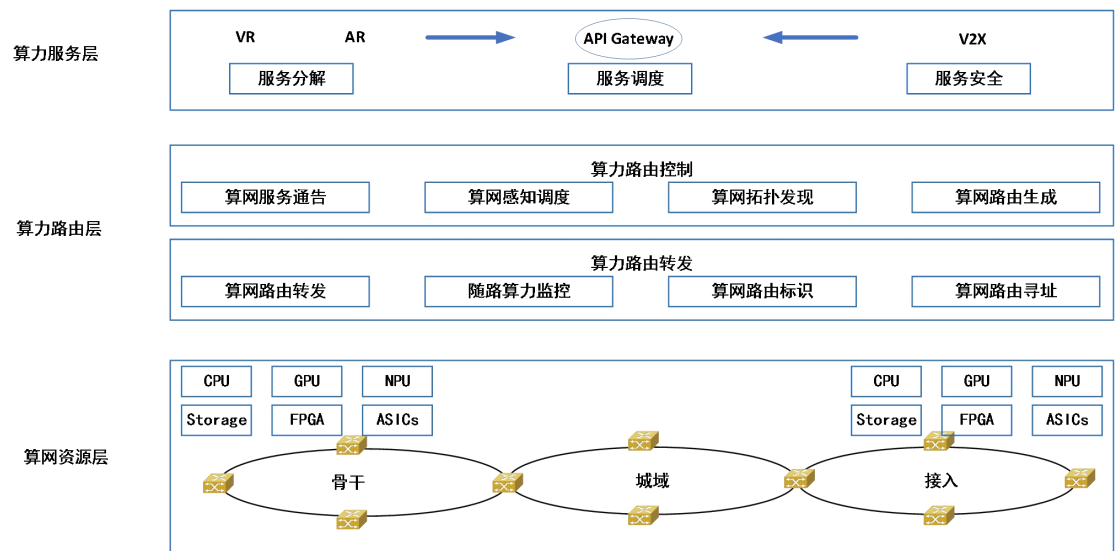


图 4. 算力感知网络架构图

1. 算力服务层

各种应用数据以及服务集合于算力服务层。这一层能够接收用户多样的应用请求，并将其关键参数或者数据传输至算力路由层，从而为用户需求感知提供必要条件。

2. 算网资源层

算网资源层是现有基础计算设施的总称。在这一层中，算力的主要存在形式

是包括边缘各类设备的 CPU，GPU 以及 FPGA 等计算资源。基于这类物理计算资源，算力资源层能够根据用户需求提供必要的算力模型，接口，标识等资源以辅助算力路由层实现对终端用户各类的计算需求的快速响应。

3. 算力路由层

算力路由层为算力感知网络中的核心，包括算力路由控制和算力路由转发。如图 5 所示，算力路由层不仅需要对整个算力网络的算力资源动态管理，还肩负着对上层用户需求的感知，根据用户的需求对下层算力进行灵活的调整，并将计算数据通过算力路由转发到算力资源层的计算设备中。其中，在这一层中包括算力感知和算力路由策略形成两个主要关键技术，而算力感知包括对用户需求的感知和对底层算力资源的感知。

- 用户需求感知

其中，对用户需求的感知要求算力路由层能够准确的捕捉用户需求的特点，并对用户的需求和数据进行合理的建模以助于后续算力路由控制。

- 算力资源感知

算力资源感知则要求算力路由层能够有效的管理网络拓扑，以及基础计算设备提供的算力资源，并将算力抽象成为虚拟的算力感知网络。其中算力的度量和建模都应该按照一个确定的度量体系进行感知，从而形成一个标准化的算力感知网络。

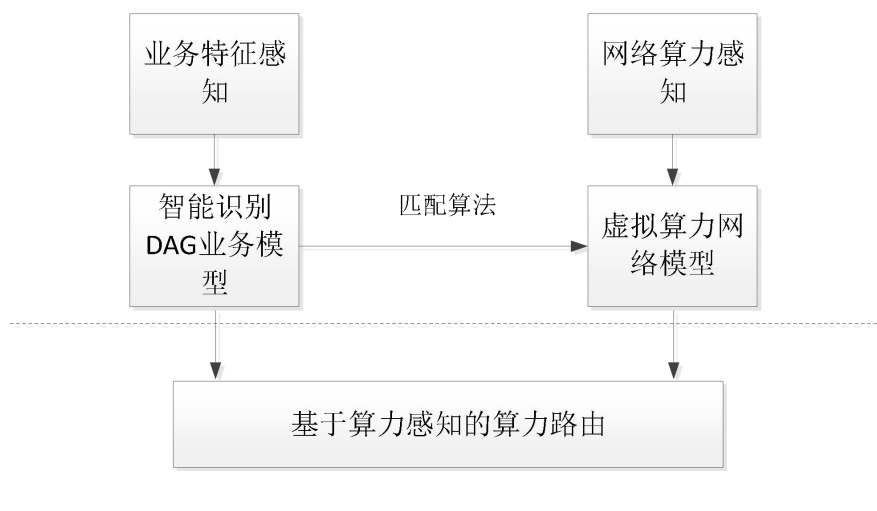


图 5. 算力路由层流程

- 算力路由策略形成

算力路由策略形成是实现网络和计算结合的关键所在,也是实现算力路由的核心部分。然而,在传统的路由优化策略中只选择最佳路径,而并未联合考虑业务所需的计算资源,这不适合计算资源与网络融合的未来发展趋势。为了应对6G算网融合的未来发展趋势,算力路由基于应用需求,结合实时的网络、算力状态信息,通过 HEFT、子图同构等调度算法,将应用请求沿最优路径调度至最优节点。基于“路径+节点”的联合计算和优化,从而实现边传输边计算,来保证业务的用户体验,提供端到端的 SLA (Service-Level Agreement) 体验保证。

以图 6 为例,网络中的 DCGW (Distributed computing gateway, 分布式计算网关) 设备将自己的位置,算力状态以及服务信息报告给附近网络,并上传至附近网络节点,从而做到了对算力网络的动态感知。用户通过客户端上传业务发起点、目的点以及业务量等需求信息,并对业务需求进行合理建模,从而做到了对业务的感知。算力路由层通过相关算力路由控制算法,将业务的计算调度到节点 1 和节点 2 以及后续的端到端传输路径上,从而实现了网络根据业务的需求灵活调整路径,按需完成业务的调度策略。

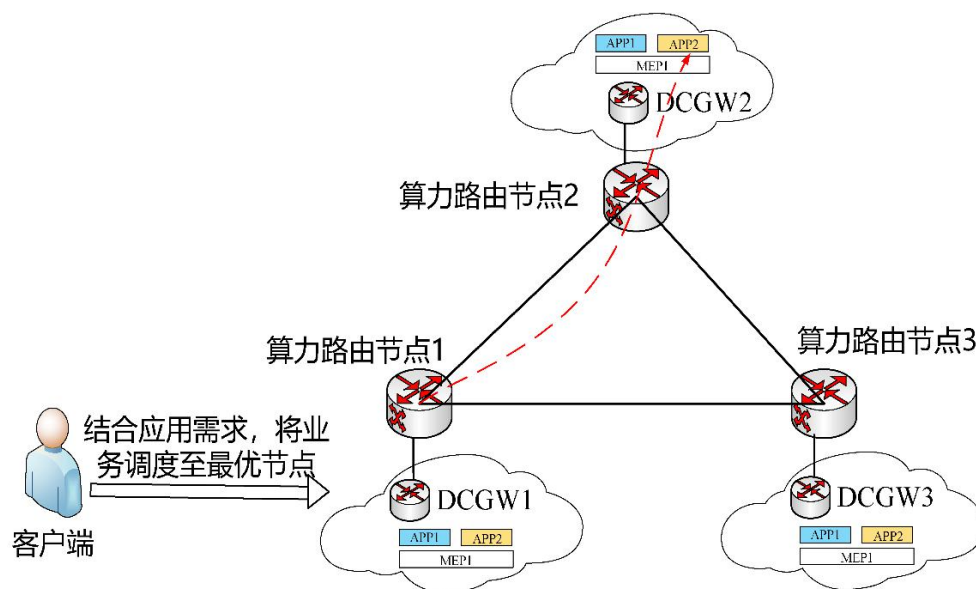


图 6. 算力路由示意图

网络为终端提供友好的算力服务除了计算卸载外,还包括算力共享。计算卸载目标是减轻终端计算负担。计算卸载有三个层次。一是在线计算,终端应用所

需的计算任务由网络承担，终端“零计算”；二是部分计算任务卸载，终端与网络协商，对于节能目的或超过终端计算能力的任务，卸载到网络；三是计算任务建模，网络基于终端业务的目标任务，确定需要计算的内容、训练的数据或学习模型，并对计算任务进行分解和分配。网络基于终端算力与位置状态，调度保证计算时延的边缘算力资源来完成计算任务。

算力共享目标是扩展终端计算能力，并获得算力收益。网络算力服务的算力资源，包括网络自身算力以及开放共享的终端算力。由于终端算力的差异性（异构性、算力水平、缓存空间大小、精度等），终端算力需要定义统一的度量准则，实现算力的可度量、可评价、可映射。算力度量具体包括异构硬件算力的度量、多样化算法算力需求的度量，以及用户算力需求的度量。算力建模主要包括算力资源模型描述、算力需求模型描述和算力评价标准和测试标准模型。例如，对异构计算资源 CPU/GPU/FPGA/ASIC 等，针对不同应用及算法算力需求，统一功能描述语言。相应地，需要引入区块链、联邦学习和隐私计算等技术来解决算力共享带来的数据与隐私安全问题。基于发布机制，网络为有计算需求的终端提供算网一体化的算力交易与调度，实现绿色高效计算。

3.4 cell free 技术支持终端‘0’感知的移动性体验

5G 相比 4G 新增加了毫米波频段作为可部署的频率资源。面向 6G，频率资源将进一步向更高频扩展，包括 100GHz 以上的毫米波频段甚至 THz 频段。可以预期 6G 部署在某些场景会更加密集，在这些超密集部署场景中，基站/小区/TRP 的数量与终端数量的比例将变得更高。

如图 7 所示，在超密集部署场景中，UE 在空闲模式下频繁搜索/测量小区，在连接模式下频繁地进行测量和报告以应对可能发生的切换，导致 UE 移动性管理相关的功耗较多。更严重的是，还会导致 UE 移动性能下降。例如，UE 已经移动到 B 小区，但由于当前移动性流程的 L3 滤波，导致 UE 仍然收到来自 A 小区的寻呼。小区重选的延迟，会产生寻呼丢失的现象；切换太晚，可能导致切换失败。对于一些新型业务如 XR 或云游戏来说，切换失败率和数据中断的移动性性能至关重要，因为会严重影响业务体验。因此，亟需研究解决方案，以解决超

密集部署场景的移动性性能下降以及终端功耗较高的问题。

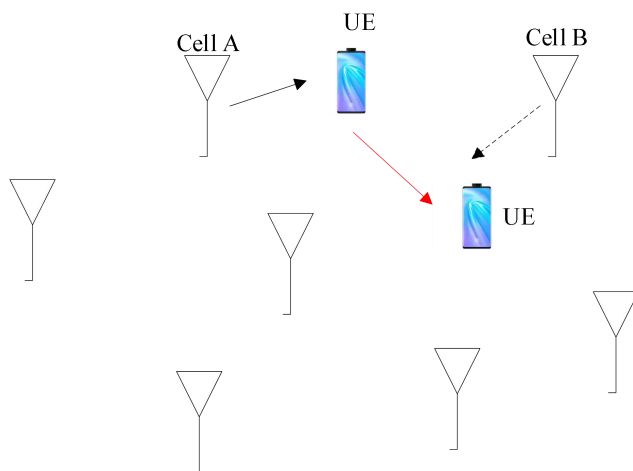


图 7. UE 频繁进行小区重选和切换导致功耗较高

3.4.1 Cell free 技术

一种 cell free 的实现架构是，空闲态或者非激活态下的终端驻留在基于 SFN（Single Frequency Network，单频网）技术的超级小区（super cell），网络提供基于 SFN 发送的同步信号/参考信号。空闲态或者非激活态下的终端将对这些基于 SFN 模式的同步信号/参考信号进行无线资源管理测量。终端的寻呼监听和系统消息读取也可以基于 SFN 模式。由于基于 SFN 发送的同步信号和参考信号的覆盖范围相比基于单小区发送的同步信号/参考信号的覆盖范围明显更远，终端可以一直测量到一个信号质量较好的基于 SFN 发送的同步信号或参考信号，因而避免基于单小区模式的频繁的小区重选流程。由于避免了频繁的小区重选流程，从而也可以减少寻呼的丢失概率。

SFN 模式由于信号从多个网络侧的节点（例如小区或收发点）发送，因此可以提供更好的覆盖性能，但是其缺点是无法获得空间复用增益，总体传输效率相比单小区传输要低；因此，空闲态或者非激活态下的终端由于其需要接收的数据量不大，可以基于 SFN 模式获得较高的覆盖性能；当终端进入连接态时，如果其需要接收或者发送的数据量较大，则终端需要切换到 non-SFN 模式，以获取更大的空间复用增益。例如，当空闲态或者非激活态下的终端接收到属于自己的下行寻呼消息时，终端需要测量 non-SFN 模式的同步信号/参考信号，并根据系

统消息的配置信息来发送 **preamble** 并完成后续的随机接入步骤，进入连接态并关联到一个或若干个节点。此时，进入连接态的终端的上行数据发送或下行数据接收都是基于该终端关联的一个或若干个节点进行的，不再基于 SFN 模式，因此整个系统可以获得更高的空间复用增益。连接态的终端在不同节点间的切换也可以采用层 1 的切换，避免传统小区切换的复杂度和信令开销。当终端完成连接态的数据收发后进入了空闲态或者非激活态，则终端只需测量基于 SFN 模式的同步信号/参考信号，并监听基于 SFN 模式的寻呼消息。

为了验证上述方案的性能，我们进行了系统级仿真。仿真中假设小区站间距是 200 米，UE 移动速度是 30km/h，DRX paging cycle 是 1.28 秒；对比了以下两种方案的 paging miss rate。

- **non-SFN 方案：** paging 消息在 57 个小区的区域内按照每个小区的方式发送，相邻小区发送的 paging 消息相互间视为干扰信号；小区重选根据 UE 测量的下行信号的质量并进行层 3 的滤波。
- **SFN 方案：** paging 消息以 SFN 的方式通过多个小区联合发送。一个 SFN 小区簇的小区个数分别是 3,9,14,19,28 和 57 个。在 SFN 小区簇内部，信号从各个小区联合发送，没有小区间的干扰；关于多个 SFN 小区簇，不同小区簇的信号相互视为干扰。

基于 non-SFN 方案和 SFN 方案下的 paging miss rate 仿真结果见图 8。可以看出，SFN 方案可以显著改善终端的 paging miss rate。SFN 一个小区簇内的小区个数越多，相比 non-SFN 方案的改善越大。

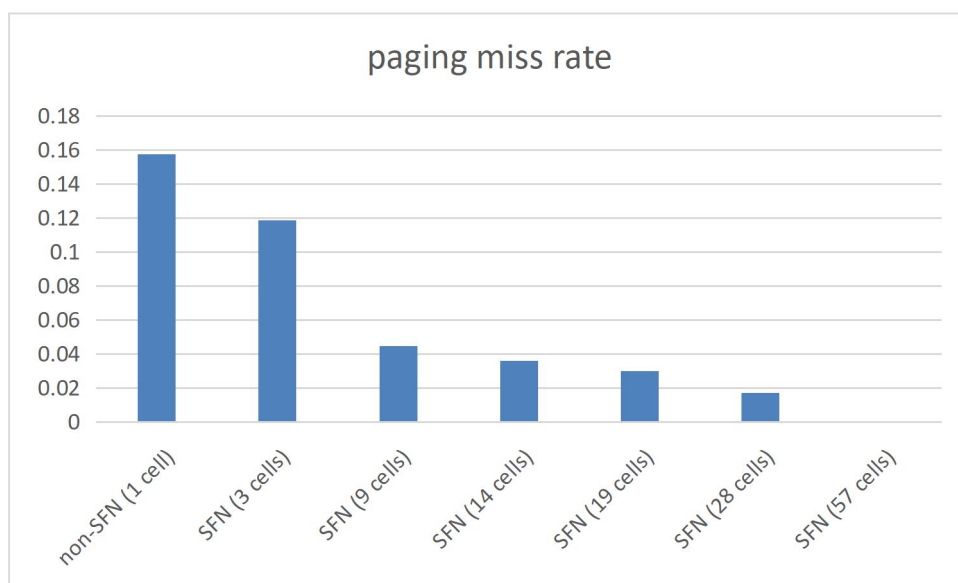


图 8. 基于 non-SFN 方案和 SFN 方案下的 paging miss rate 仿真结果

为了验证不同方案的 UE 节能性能，我们采用 3GPP TR 38.840^[7] 中定义的 5G UE 功率模型，假设 SSB burst 的周期是 20ms。假设 50% 高 SINR UE，20% 的中 SINR UE 和 30% 的低 SINR UE。在每个 paging 周期检测 paging PDCCH 之前，高 SINR UE，中 SINR UE 和低 SINR UE 为了维持下行同步而需要处理的 SSB burst 的个数分别是 3 个，2 个和 1 个。

仿真中对比了以下两种方案的 UE 节能性能：

- **Baseline 方案（non-SFN 方案）：**UE 在移动过程中对服务小区的下行同步信号/参考信号进行测量，根据 S-measure 机制决定是否进行邻区测量 (intra-frequency/inter-frequency) 和小区重选。
- **SFN 方案：**UE 在移动过程中对基于 SFN 模式发送的服务小区簇的下行同步信号/参考信号进行测量，根据 S-measure 机制决定是否进行相邻小区簇的测量 (intra-frequency/inter-frequency) 和小区簇重选。可见，UE 基本上只在 SFN 小区簇的边缘才会发生服务小区簇的信号质量下降，才有可能进行相邻小区簇的测量。

从图 9 可以看出，因为 SFN 方案相比 non-SFN 方案的邻区测量/邻簇测量的数量更少，因此对 UE 节能更为有利。SFN 一个小区簇内的小区个数越多，相比 non-SFN 方案的 UE 节能增益越大；UE 的 SINR 越低，UE 的节能增益越大。相

比 non-SFN 方案，对于所有 UE 来说，SFN 方案的省电增益为 9%到 28%；对于中 SINR 和低 SINR 的 UE 来说，SFN 方案的省电增益为 15%到 44%。

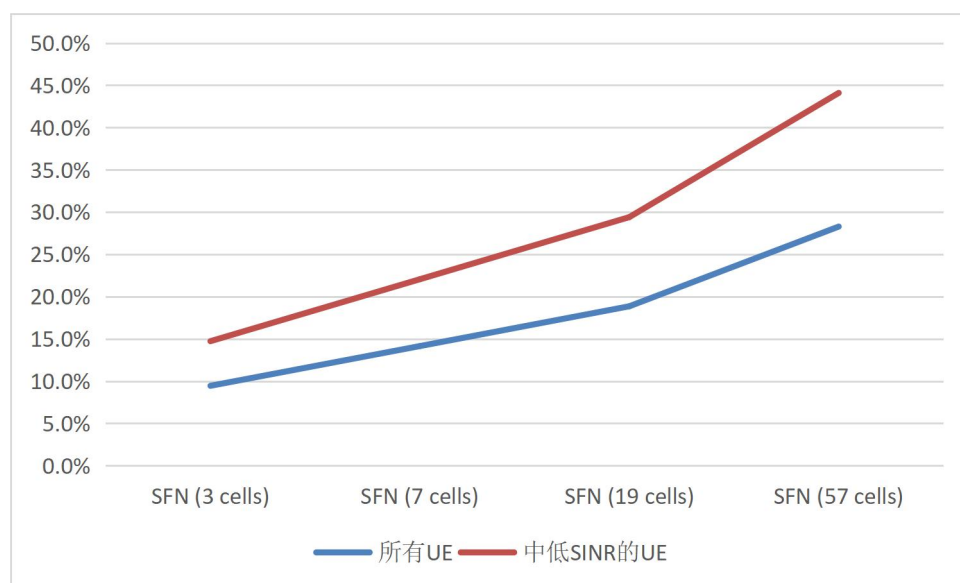


图 9. SFN 方案相比 non-SFN 方案的 UE 节能增益

3.4.2 上行辅助的移动性增强

为了减少系统发送寻呼消息的开销，空闲态或者非激活态下的终端可以周期性的发送上行参考信号，网络侧的一个或多个节点检测到该终端发送的上行参考信号之后，就确定了该终端所在的地理范围（假设该终端发送的上行参考信号与终端 ID 关联）。那么，针对该终端的寻呼消息可以由在该终端所在的地理范围内的一个或多个节点来发送。与传统寻呼过程中网络侧在更大规模的节点上广播寻呼消息相比，上行辅助的寻呼消息发送可以减少发送寻呼消息的节点个数，可以减少网络寻呼负载和节省网络能量消耗。网络侧基于多个节点接收到的终端上行参考信号的接收信号质量（例如 RSRP，SINR 等）的不同，选择合适的一个或多个节点来发送针对该终端的寻呼消息，实现了“网随人动”。进一步的，终端周期性的发送上行参考信号，使得网络侧获得一定程度的上行参考信号的质量信息，可以提高小区重选的成功率。

需要注意的是，上行辅助的移动性增强方案可以和上述的 cell free 方案结合使用，也可以单独使用。

3.5 Backscatter 和近零功耗接收支持终端‘0’功率通信

IMT-2030 (6G)推进组于 2021 年发布的《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》^[3] 提出了“万物智联，数字孪生”的 6G 愿景，并对 6G 绿色节能提出新的发展要求。2020 年 9 月，中国宣布力争二氧化碳排放于 2030 年前达到峰值，2060 年努力实现碳中和。另一方面，未来物联网设备数将达到千亿级别，向无源发展。未来物联网相关的需求包括：

- 极低功耗：针对功耗敏感的设备，实现“0 比特，0 瓦特”愿景
- 极低成本：针对成本敏感的设备，其成本相比 NB-IoT 进一步降低
- 连接密度：相比 5G 有 10 到 100 倍的提升，10-100 个/m²

为了满足上述需求，支持终端‘0’功率通信，从发送方式方面可考虑极低功耗发送技术，典型技术包括反向散射 backscatter 通信技术，以支持极低功耗极低成本极低速率要求的 IoT，与较低功耗中速率要求的 UE 短距离通信；从接收方式可考虑极低功耗接收技术，典型技术近零功耗接收机（Almost zero power receiver, AZP），支持极低功耗唤醒来解决空闲态终端待机的功耗问题；从终端硬件架构方式可考虑无功放技术，提升终端低发送功率时的功率效率。

3.5.1 Backscatter 通信技术

3.5.1.1 原理与应用场景

反向散射 backscatter 通信设备利用其他设备发送的射频信号或者环境中的射频信号进行信号调制来传输自己的信息。其调制电路如图 10 所示，设备通过调节其内部阻抗来控制电路的反射系数 Γ ，进而改变入射信号的幅度、频率或相位，实现信号的模拟或数字调制。公式(1)表示电路反射系数的计算方法，其中 Z_0 为天线特性阻抗， Z_1 是负载阻抗。假设入射信号 $S_{in}(t)$ ，则输出信号为 $S_{out}(t) = |\Gamma|S_{in}(t)e^{j\theta_r}$ 。模拟调制调节内置模拟电路来改变阻抗 Z_1 ，数字调制利用控制器改变阻抗 Z_1 。目前射频识别 RFID（Radio Frequency Identification）系统和电子

不停车收费系统(Electronic Toll Collection, ETC)是反向散射技术大规模商业化的经典案例。

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = |\Gamma|e^{j\theta_\Gamma} \quad (1)$$

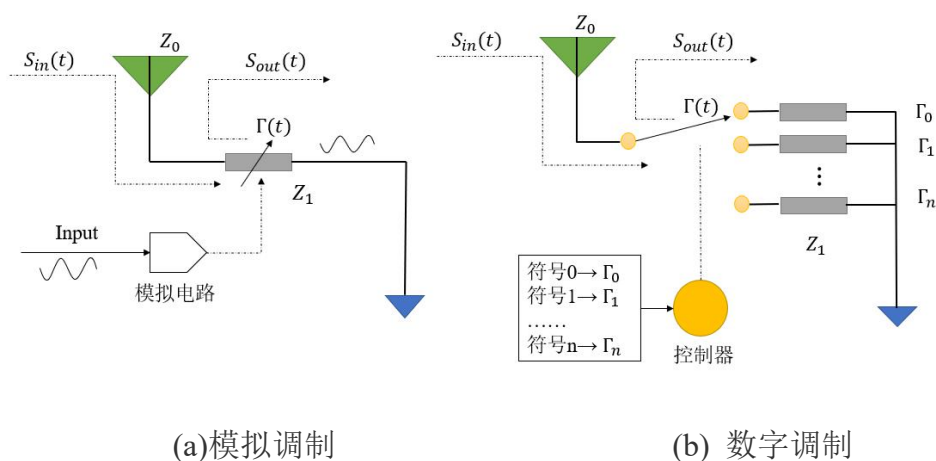


图 10. 反向散射模拟和数字调制电路

反向散射通信设备的能量来源包括专用射频信号,或环境能量例如环境中的射频信号,太阳能,振动,热能等,或者设备自身安装的电池等。无源反向散射通信设备首先需从外界射频信号中获取能量 (Energy harvesting), 供给内部电路模块工作, 然后再反向散射射频信号进行通信, 做到零功耗通信。

反向散射通信的典型应用场景包括两大类, 如图 11 所示, 一类是广域覆盖场景, 具体包括物流跟踪, 环境监测, 智慧农业, 铁路运营维护和无人机巡检等; 另一类是局域覆盖/本地场景, 具体包括智慧家庭, 低功耗健康监测, 可穿戴设备的低功耗回传, 工业传感器网络, 生物内置传感芯片等; 一般来讲, 覆盖和通信速率是成反比的, 因此广域覆盖场景的覆盖要求比局域覆盖/本地场景的要求更高, 通信速率的要求更低。

广域覆盖场景

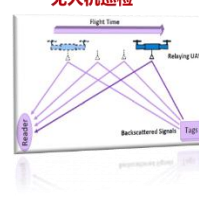
物流追踪



环境监测, 智慧农业

铁路运营维护
(入侵检测、接触网监测)

无人机巡检



局域覆盖/本地场景

智慧家庭



低功耗健康监测



可穿戴设备的低功耗回传



工业传感器网络



生物内置传感芯

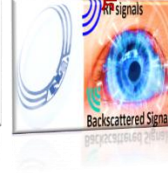


图 11. 反向散射通信的典型应用场景

自 2013 年以来, 业界提出了一系列新型反向散射通信技术, 以下给出 8 个案例^[8]。Kimionis 等人于 2014 年提出了双站反向散射(Bistatic Backscatter), 在标签附近设置一个载波发生器(如图 12(b)所示)。由于载波发生器距离标签近, 能有效减少路径损耗, 进而扩大了标签和读写器之间的通信距离, 在供能载波功率为 20 mW 时, 标签通信距离为 130 米左右。Liu、Parks 等人于 2013 年和 2014 年提出了环境反向散射(Ambient Backscatter), 该技术不需要载波发生器, 利用标签周围已有的电视广播和 WiFi 等无线信号来触发通信(如图 12(c)所示)。目前相关的研究已设计出了传感器、接收信号能量检测的原型电路和通信协议, 展示了该技术的商业应用的潜力。2015 年 Bharadia 等人提出了基于全双工的反向散射技术, 利用多天线的 WiFi 网关协助用户和标签同时通信, 实现高效全双工通信(如图 12(d)所示)。WiFi 网关支持多种调制方式, 在通信距离为 1 米时, 数据速率可达 5Mbps。2016 年提出的 Inter-Technology Backscatter 通过改变标签的阻抗, 将蓝牙信号转换为 WiFi 信号或者 ZigBee 信号(如图 12(e)所示), 在信号速率为 2Mbps 时, 所需信号的功率仅为 $28\mu\text{W}$, 扩大了反向散射通信的应用范围。2017 年提出的基于 LoRa 的反向散射技术(LoRa Backscatter)利用了 LoRa 信号高灵敏度(-149dBm)和扩频编码技术, 实现远距离反向散射通信(如图 12(f)所示), 实验通信距离最远可达 475 米。2017 及 2018 年提出的基于反向散射技术的智能表面辅助通信技术可实现无线环境的重构和增强。智能表面由多个反射单元构成, 每个反射单元都可与入射信号进行交互(如图 12(g)所示)。东南大学设计的一种智能

表面，通过调节反射信号的相位实现了 8PSK 调制，通信速率可达 6.144 Mb/s。Mehrdad 等人于 2019 年提出的反向散射大规模接入机制(NetScatter)使用了联合开关键控的分布式啁啾(chirp)扩频编码机制 (如图 12(h)所示)，可支持多设备并发接入，同时接入 256 个设备时，通信带宽仅为 500kHz。Taekyung 等人于 2020 年提出的全信号反向散射技术(AnyScatter)根据非相干信道天线之间的相位差是恒定的这一现象，利用接收信号的相位差判别接收符号信息(如图 12(i)所示)，消除了现有研究中对特定类型射频信号的反向散射技术的依赖。

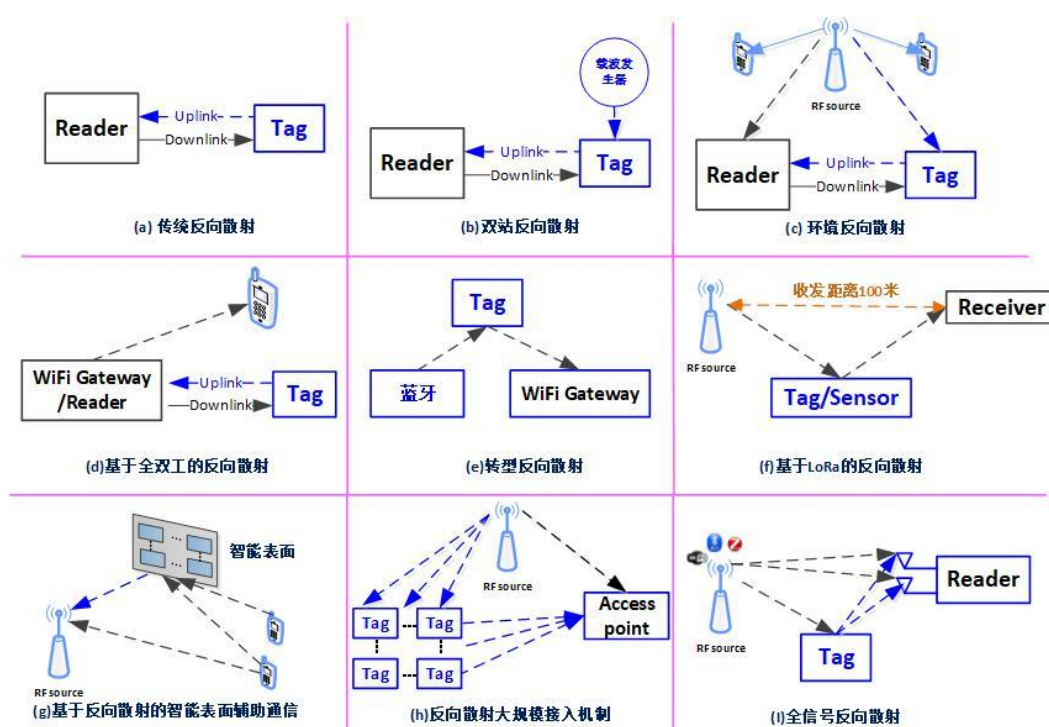


图 12. 新型反向散射通信技术

3.5.1.2 技术与协议设计方面的挑战

反向散射通信技术目前面临着以下 7 个技术方面的挑战：

(1) 缺少反向散射通信的理论。考虑信号源有 M 根天线，反向散射设备有 K 根天线，接收反向散射信号的设备有 N 根天线，如何求解 $M \times K \times N$ 级联信道下的反向散射的信道容量（包括链路预算）是急需研究的问题。

(2) 反向散射通信速率较低。无源设备由于能量限制一般采用低阶调制，且受制于晶振稳定性以及同步和干扰的挑战，因此其通信速率较低。近距离中高速率绿色通信是未来 6G 需求之一，如何进一步提高近距离传输速率，例如通过引入 MIMO 和高阶调制，提升自干扰消除的性能等手段来提高传输速率，是反向散射通信走向实用的关键挑战之一。

(3) 信道估计和复杂信号检测。反向散射通信系统中的无源设备发送导频的能力受限，接收端收到的信号是反射信号与射频源信号的叠加，尤其在多用户接入时，接收信号如何建模、信道参数如何提取、如何检测反射信号都需要研究。

(4) 大规模用户接入。无源设备存储和计算能力有限，传统网络中的防冲突算法很难适用于大规模无源设备接入。设计大量用户接入场景下的防冲突算法是有实用价值的研究方向。

(5) 自干扰消除。无源反向散射通信系统中的接收信号是有用的反向散射信号和各种干扰包括自干扰信号的叠加，干扰信号的强度可能远大于反向散射信号强度。从强干扰信号中恢复有用信号是一个重要挑战。

(6) 覆盖性能有限。由于受到衰减和干扰的影响，反向散射传输的距离受限。当前通过中继、扩频和 LoRa 技术等方法能提高通信距离，未来结合大规模反射阵列、蜂窝物联网和多层异构网络，实现广覆盖是网络演进方向之一，覆盖和功率时间等资源的权衡也是值得研究的理论课题。

(7) 间歇通信的问题。支持储能的无源反向散射设备需要一段时间从环境中吸收能量，待储能达到一定门限时才能驱动设备电路进行工作，因此能量采集阶段与通信阶段的联合优化设计也是待研究的课题。

传统的反向散射传输的距离受限，基于蜂窝的无源物联网有助于将无源物联网从传统的短程应用扩展到广域蜂窝无线网络应用，为客户提供方便和标准化的蜂窝网络功能，并激发新的应用和市场方向。根据反向散射设备的上行链路/反向链路（即反向散射设备发送信息，其他设备接收信息的链路）与下行链路/前向链路（即其他设备发送信息，反向散射设备接收信息）的不同，反向散射与蜂

蜂窝通信共存的模式包括三种。如图 13 所示，模式一为基站直连模式，即基站和反向散射设备直接连接，完成上下行信息的收发。模式二为 UE/relay 辅助模式，即反向散射设备的上行链路或下行链路的至少一条链路需要 UE 或 relay 参与，例如上行链路是反向散射设备发送信息给 UE，UE 转发信息到基站；模式二中，根据上行链路和下行链路是基站与反向散射直连或通过 UE/relay 转发，以及为反向散射设备的供能设备是基站还是 UE，又可以进一步分为 6 个子模式：子模式 2-1 到 2-6；模式三是 UE 或 relay 直连模式，即 UE 或 relay 和反向散射设备直接连接，完成上下行信息的收发。表 2 汇总了不同子模式的设备的自干扰消除能力要求和下行接收灵敏度要求。

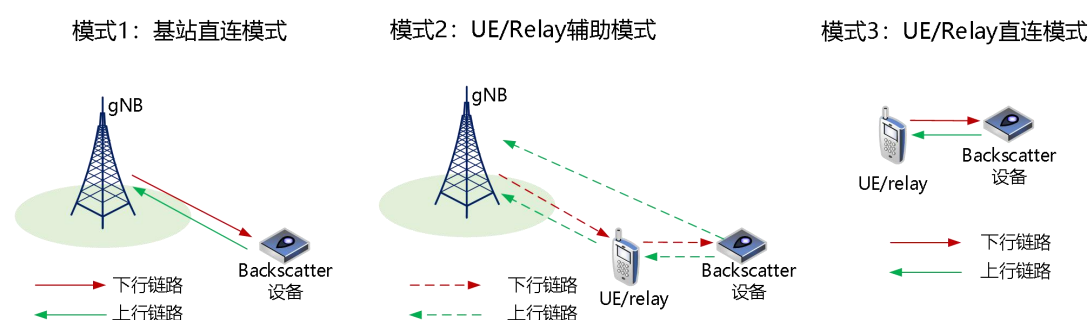


图 13. 反向散射与蜂窝通信共存的几种模式

表 2. 反向散射与蜂窝通信共存的几种子模式及说明（表中的设备指 backscatter 设备）

模式	子模式	下行链路/前向链路	上行链路/反向链路	供能方/信号源	设备的自干扰消除能力要求	下行接收灵敏度要求
1	1-1	基站→设备	设备→基站	基站	低	高
2	2-1	基站→设备	设备→UE→基站	基站	低	高
	2-2	基站→设备	设备→UE→基站	UE	高	高
	2-3	基站→UE→设备	设备→基站	基站	低	低
	2-4	基站→UE→设备	设备→基站	UE	低	低
	2-5	基站→UE→设备	设备→UE→基站	UE	高	低
	2-6	基站→UE→设备	设备→UE→基站	基站	低	低
3	3-1	UE→设备	设备→UE	UE	高	低

值得注意的是，表 2 中假设为反向散射设备提供能量的设备与提供信号源的设备是同一个设备。该设备可以是基站、UE 或 relay，还可以是其他独立网元/节点。进一步的，反向散射设备还可以从多个不同种类的设备获取能量，从而提高能量收集效率。同样，接收反向散射信号的设备除了是基站、UE 或 relay 之外，还可以是其他独立网元/节点。进一步的，反向散射信号还可以由多个设备进行联合接收。

反向散射与蜂窝通信共存带来的接入网协议设计的挑战主要包括：

- (1) 轻量化协议栈：无源设备对节电要求更高，需要给无源设备提供定制化可编排的轻量协议栈。一方面可以考虑简化或者融合的协议栈，压缩协议栈层数；另一方面，也可以对协议栈某些不必要的功能进行简化。
- (2) 简化的连接控制：对于物联网中的小数据包，只挑选“内核”流程进行通信，采用无连接方式的数据传输，甚至是直接基于包的传输管理。

- (3) 移动性重定义：考虑终端的极低成本需求，设备的移动性可以尽量由网络侧来处理，网络侧做到服务和资源解耦，使设备不需要知道所属小区或能量源，就可以享受不间断的服务。
- (4) 高效的接入机制：提供高效的接入机制，以避免多个用户同时接入网络时可能产生的冲突。
- (5) 灵活的资源调度：网络侧调度时考虑终端收集或者反射能量的能力。
- (6) 传输安全性：考虑无源物联网的传输安全性。

反向散射与蜂窝通信共存带来的核心网协议设计方面的挑战主要包括：

- (1) 引入专门的网元对海量无源设备订阅信息或用户信息进行管理。
- (2) 核心网支持无源物联网设备的注册、鉴权和认证，提高安全性。
- (3) 简化的承载管理及 QoS 保证。
- (4) 无源物联网设备的移动策略优化，例如无源设备几乎透明的移动性管理机制。

对 Backscatter 相关技术感兴趣的读者，可以进一步参考 FuTURE 论坛同时发布的另外一本白皮书《零功耗通信》^[9]。

3.5.2 近零功耗接收机

3.5.2.1 原理与应用场景

目前的手表、手环等可穿戴设备的待机时间受限于电池容量。3GPP Rel-17 RedCap 项目提出了手表等可穿戴设备需要满足 1 到 2 周的待机时长需求，这个需求现有手机等终端远不能满足的。此外，面向资产追踪、智慧家庭、以及一些工业和安全领域的场景，要求很长时间的待机同时并要求“秒”级别的响应，这也是现有技术无法满足的。

为了提升待机时间，传统的节约功耗的办法比如通过减小终端周期性侦听寻

呼消息的频次来实现，如 eDRX, PSM 等技术，可以将终端在空闲态的功耗从几十 mW 降低 100-1000 倍到几十 uW 量级。然而这将导致寻呼的时延变得非常的长，远不能满足设备“秒”级别的响应需求。

目前近零功耗接收机是业内的热点方向，依赖少量自身储能或通过能量收集来侦听唤醒信号，在需要时唤醒主要通信模块。如图 14 所示，设备开启一个单独的唤醒接收机来接收可能的唤醒信号，以便随时唤醒设备的主通信模块。极低功耗唤醒机制可以极大减少设备功耗。主通信模块只有在终端接收到目标唤醒信号时才开启，否则一直处于关闭或者休眠状态。唤醒接收机由于其功耗极低，可以一直处于开启状态。近零功耗接收唤醒信号使得终端在保持非常低的功耗情况下一直监听唤醒信号，有助于解决唤醒延时的问题。这种大幅度的能耗降低是通过更简单的接收机结构，例如仅通过射频前端检测，或者更简单的包络检波来实现的。目前有大量的学术文献已经对此有了深入的研究和相应的样机/芯片发表。例如文献^[10]实现了 -76dBm, 7.4nW 的唤醒接收机，文献^[11]实现了 -97dBm, 99uW 级别的唤醒接收机。

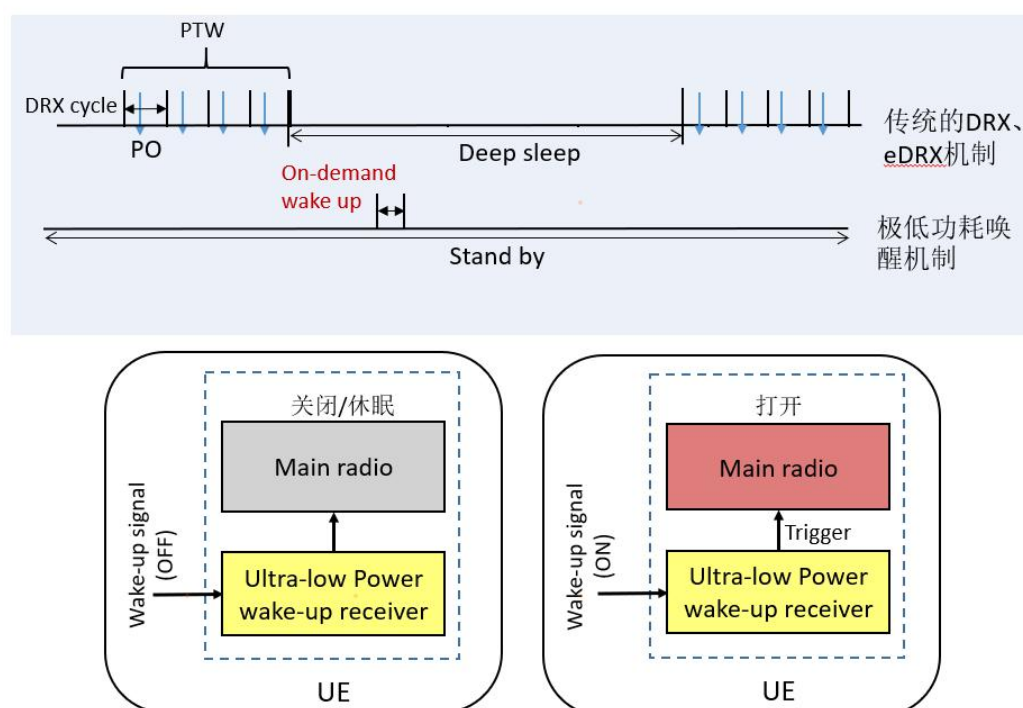


图 14. 极低功耗接收技术原理

图 15 是一种可能的近零功率唤醒接收机的架构。由于可以采用包络检波，省去了传统射频前端接收机中的高质量本地晶振和混频器的要求，可以大大降低对于功耗的要求。另外，由于后端采用了简单的模拟电压比较电路，省去了高质量的 ADC（模数转换）器件的要求。最后的数字处理部分利用简单的 MCU 或者更简单的 DSM (Digital state machine) 来对于接收到的唤醒信号进行基带处理，根据结果决定是否唤醒主模块。通过上述的一系列简化的信号处理，能够做到将待机功耗相比现有的空闲态终端待机功耗降低 100 到 1000 倍，达到 μW 甚至 nW 量级。能量供应方面，近零功率唤醒接收机可以集成 energy harvesting 技术或者安装容量很小的纽扣电池，可以根据需求灵活选择能量供应方案。

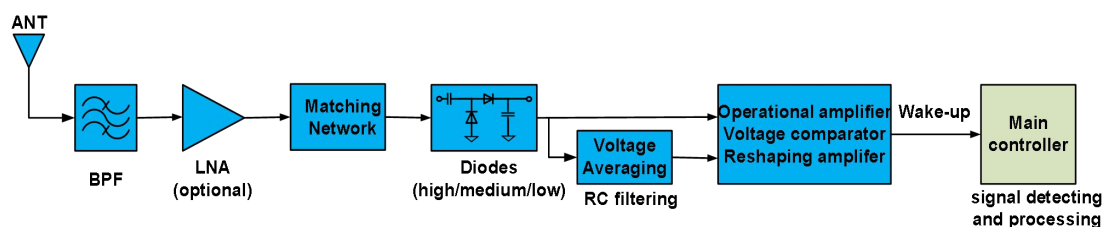


图 15. 近零功率唤醒接收机的架构

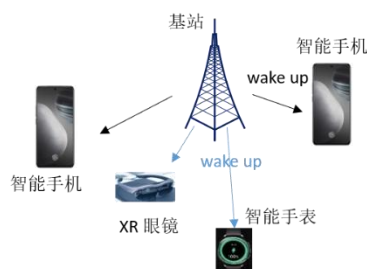
近零功耗接收机的应用场景主要分为两大类。如图 16 所示，一类是极低功耗唤醒场景，例如手机唤醒可穿戴设备，以及基站唤醒手机。以基站唤醒手机为例，传统方案是手机以 DRX 的方式周期性的醒来并监听基站发送的 paging 消息，目前的平均功耗水平是几十毫瓦；若采用近零功耗接收机，由于其平均功耗只有传统方案的百分之一到千分之一，因此可以一直开启接收机监听唤醒信号，而不需采用 DRX 模式周期性的监听。第二类是极低功耗数据接收场景，在一些数据速率要求很低的间歇性小包传输的场景中，可以利用近零功耗接收机来接收这些小包，减少设备功耗。这类场景具体包括智慧家庭，低功耗健康监测，工业传感器网络，以及生物内置传感芯片等。

极低功耗唤醒

手机唤醒可穿戴设备



基站唤醒手机



极低功耗数据接收

智慧家庭



低功耗健康监测



工业传感器网络



生物内置传感芯片

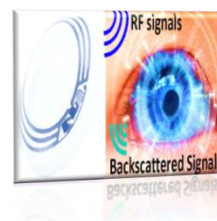


图 16. 近零功耗接收机的应用场景

3.5.2.2 技术与协议设计方面的挑战

近零功耗接收机的一个主要技术问题是其接收灵敏度相对较低。为了解决接收机灵敏度问题，一方面，可以为近零功耗接收机选择合适的应用场景，例如将近零功耗接收机优先部署在覆盖要求不高的场景，例如室内场景和站间距较小的城区密集场景。另一方面，可以从技术手段入手来改善近零功耗接收机的灵敏度性能；一种方案是在接收链路上增加 LNA (Low Noise Amplifier, 低噪声放大器)，能带来约 20 到 30dB 的灵敏度改善，但是其代价是提升了接收机的功耗。

根据 3GPP 的评估方法，我们通过仿真给出了图 17 和图 18 分别代表的室内热点和城区密集部署场景下的接收功率 RSRP 的分布曲线。可以看到：如果唤醒接收机的接收灵敏度能达到 -70dBm 的话，那么在 Indoor Hotspot(室内热点)场景下 85%~95% 以上的用户能够达到接收灵敏度要求，在 Dense Urban(城区密集部署)场景下 80%~85% 以上的用户能够达到接收灵敏度要求；如果唤醒接收机的接收灵敏度能达到 -90dBm 的话，那么在 Indoor Hotspot(室内热点)和 Dense Urban(城区密集部署)场景下，几乎所有的用户都能达到接收灵敏度要求。

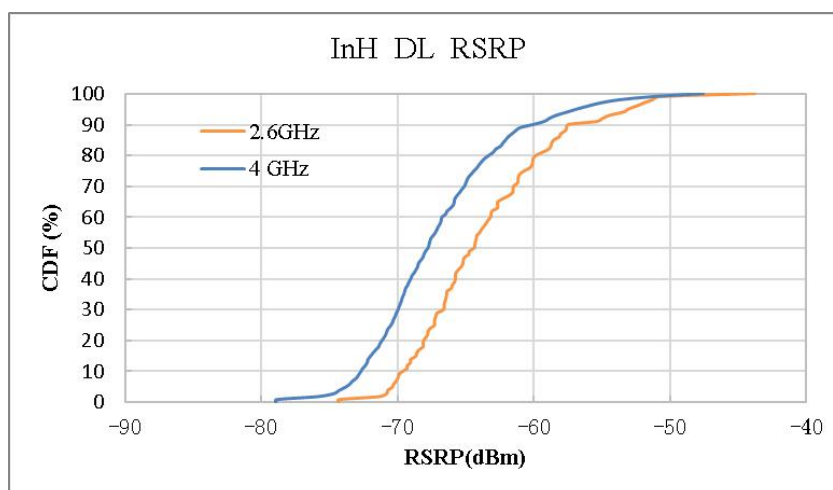


图 17. Indoor Hotspot(室内热点)场景下接收功率 RSRP 的分布

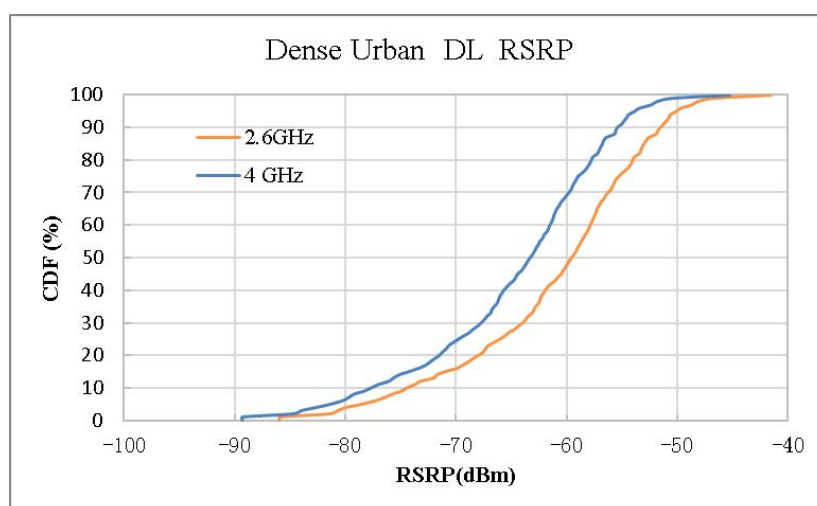


图 18. Dense Urban(城区密集部署)场景下接收功率 RSRP 的分布

从标准化协议设计的角度，近零功耗接收机存在如下挑战：新的波形设计，例如需要设计新的基于开关键控(On-Off-Keying)的波形，由于潜在的接收机灵敏度下降影响带来的问题，干扰抑制问题，多用户复用问题，与现有系统共存问题等。

3.5.3 无功放技术

现有终端的发射链路通常包含 transceiver, PA, switch, 滤波器, 天线等。Transceiver 输出的信号经过 PA 放大后经天线发出。随着 4G/5G 网络部署的多样化，存在大量的小小区部署或者室内部署场景。在这样的场景中由于终端距离基站较近，终端仅需要较低的发射功率就可以满足上行业务传输的需求。在低发射

功率情况下，存在功放效率低的问题，将导致终端较大的能量消耗，不利于终端节能。此外，对于短距离通信场景例如 D2D，sidelink 等，也存在同样的问题。

图 19 给出了现有终端射频链路的示意图，可以看到 transceiver 输出的信号是需要经过 PA 放大后经过天线发射出去。PA 是需要进行供电的，因为实现的限制，PA 不能将输入功率完全转换为输出功率。PA 效率（PAE）大致可以定义为 $PAE = (P_{out} - P_{in})/P_{DC}$ ，其中 P_{out} 为 PA 输出 RF 信号功率、 P_{in} 为 PA 输入 RF 信号功率， P_{DC} 为 PA 的直流供电功率。

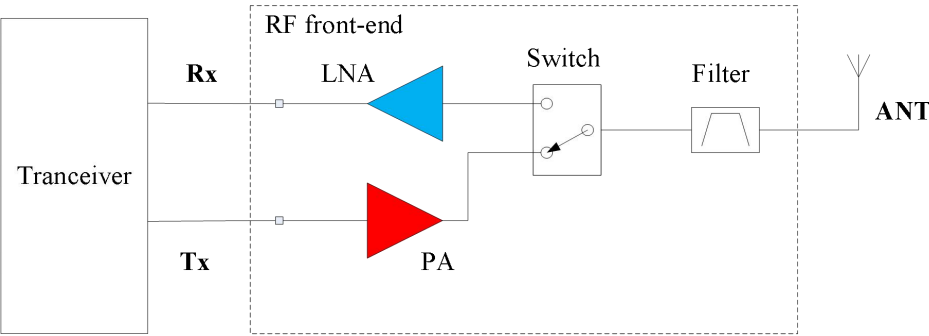


图 19. 现有终端射频链路的示意图

表 3 给出一组终端 PAE 测试结果，可以看到在 PA 输出功率较低例如 15dBm 以下时，PAE 小于 10%，也就意味着给 PA 供电的 90%功率被浪费了。某些频点下，PA 的效率甚至只有不到 5%。

表 3. UE 的 PA 效率 (标红代表低于 15%)

Power		B1-FDD-1950MHZ		B8-FDD-900MHZ		B39-TDD-1900MHZ		B40-TDD-2350MHZ		B41-TDD-2595MHZ	
P _{OUT} (dBm)	Backoff (dB)	P _{DC} (mW)	PAE (%)	P _{DC} (mW)	PAE (%)	P _{DC} (mW)	PAE (%)	P _{DC} (mW)	PAE (%)	P _{DC} (mW)	PAE (%)
27	0	2.1888	22.90	1.4668	34.17	0.6346	78.98	0.76	65.95	0.6802	73.68
25	2	2.0748	15.24	1.3224	23.91	0.57	55.48	0.57	55.48	0.6004	52.67
23	4	1.5504	12.87	1.0944	18.23	0.4826	41.34	0.437	45.66	0.4408	45.26
21	6	1.3148	9.58	0.8322	15.13	0.4066	30.96	0.342	36.81	0.3344	37.65
19	8	1.1438	6.94	0.6802	11.68	0.3382	23.49	0.266	29.86	0.2394	33.18
17	10	0.9918	5.05	0.5396	9.29	0.2926	17.13	0.228	21.98	0.1824	27.48
15	12	0.8284	3.82	0.4142	7.63	0.2432	13.00	0.171	18.49	0.133	23.78
13	14	0.76	2.63	0.3458	5.77	0.2166	9.21	0.1406	14.19	0.1102	18.11
11	16	0.7106	1.77	0.2698	4.67	0.171	7.36	0.114	11.04	0.076	16.56

为了解决上述在发送功率较低时终端 PAE 较低的问题,可以考虑引入一种新的相比 UE power class 2 和 UE power class 3 更低的 UE 功率等级,例如这一类 UE 的最大发射功率限定为 10 到 15dBm。这类设备没有 PA。在需要发送上行信号时,直接将 Transceiver 输出的信号发射出去而不经 PA 放大。因此避免了 PA 效率较低的问题,同时也节省了 PA 的成本。

另外一种解决思路是,终端根据实际需要的发射功率的等级,决定是否采用 PA 进行功率放大。如图 20 所示,在需要的发射功率等级较低时,直接将 Transceiver 输出的信号发射出去而不经 PA 放大。在需要的发射功率等级较高时,Transceiver 输出的信号经过 PA 之后再发射出去。通过这种灵活开关 PA 的终端射频链路架构,可以有效避免终端发射功率较低时 PAE 较低的问题,利于终端节能。

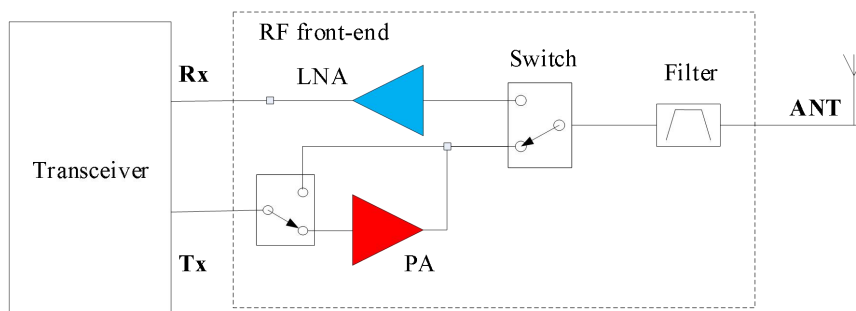


图 20 一种灵活开关 PA 的终端射频链路示意图

3.6 新型多址接入支持终端的免调度传输和上行异步传输

针对数据传输所采用的多址技术,1G 以 FDMA 技术为基础,2G 以 TDMA 技术为基础,3G 以 CDMA 技术为基础,4G 以 OFDMA 技术为基础,5G 在研究和标准化过程中曾经尝试引入 NOMA 技术,但最终依旧保留了 OFDMA 技术作为其数据传输的基本方案^[12]。在 6G 系统中,需重新设计新型 NOMA,以提升频谱效率、支持巨量终端接入。

与 OFDMA 技术相比,NOMA 技术可以得到更高的频谱效率。针对 6G 中巨量终端的场景,对低复杂度的终端,可以使用 NOMA 技术得到更高的频谱效率。

终端与基站之间频繁复杂的信令交互，需要消耗终端大量的能量，信令开销会限制可支持的终端数量，针对 6G 中巨量终端的场景，需要一种非协调的多址接入技术^[13]。因此，面向终端友好的 6G 技术，在多址接入技术方面，可以使用 NOMA 技术、非协调多址接入技术支持 6G 中巨量终端的场景。

3.6.1 NOMA 技术

正交多址技术为每个用户分配独享的无线资源，包括频率资源和/或时间资源和/或正交扩频码资源等；非正交多址技术，即 NOMA，允许多个用户共享同一无线资源和/或非正交扩频码资源。

这里以 PDMA 为例介绍 NOMA 技术在 6G 中的演进。

PDMA 技术的基本思想是基于发送端和接收端的联合设计，在发送端对多个用户的数据进行不等分集度扩频，并映射到相同的时频资源上，利用不同扩频图样来区分多个用户，在接收端用高性能的干扰删除技术，实现非正交多用户的数据传输。

PDMA 通过构造不等分集度的方式，把每个用户的待传输数据采用特定的映射图样（PDMA 编码图样）映射到一组资源上。PDMA 编码图样定义了数据到资源的映射规则，具体定义了数据映射到多少个资源，映射到哪些资源。其中资源的个数决定了数据的发送分集度，不同的用户通过 PDMA 编码图样确定的映射资源获得不同的发送分集度。

以 6 个用户在 4 个资源单元 RE 上进行复用为例。图 21 给出了 PDMA 编码图样矩阵和对应的资源映射。矩阵 G 为编码图样矩阵，矩阵中元素，‘0’表示不发送数据，‘1’表示有数据映射到相应的资源，即发送数据。用户 1 的数据映射到组中的所有四个资源，用户 2 的数据映射到前三个资源，用户 3 的数据映射到资源 1 和资源 3，等等。六个用户的传输分集度分别为 4、3、2、2、1、1。

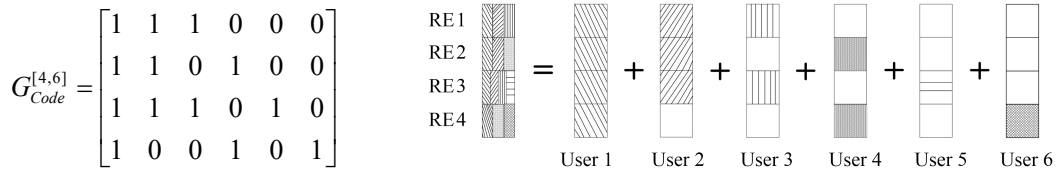


图 21. 六用户复用四个资源单元

扩展序列的非零元素从 $\{1, -1, j, -j\}$ 中选择。1 表示在对应资源上直接传输，-1 表示对应数据的相位旋转 180 度后再传输，j 表示对应数据的相位旋转 90 度后再传输，-j 表示对应数据的相位旋转 270 度后再传输。

为了提升频谱效率，通常的做法是采用 massive MIMO 技术，但是对于低复杂度的终端来说，massive MIMO 实现复杂度较高，特别是随着终端天线数目的进一步增加，由 massive MIMO 获得的增益越来越不明显，但是付出的复杂度代价越来越高，NOMA 技术通过信号处理和基站侧的干扰删除技术，可以降低终端的复杂度，同时获得更好的频谱效率性能。

为了满足 6G 的需求，包括支持巨量终端的传输、提高传输效率、降低实现复杂度等，需要对 NOMA 技术本身进行演进，例如设计更多、更长的 NOMA 序列等。

3.6.2 非协调多址接入技术

近年来，一种非协调多址接入技术的出现，为实现巨量终端的接入和传输提供了一种新的可能。理论上，巨址接入可实现巨量终端的接入和传输。

在传统的多址接入技术中，终端与基站之间频繁复杂的信令交互，包括随机接入、传输配置、资源调度、数据传输等环节都需要进行多次的信令交互，这些信令交互需要消耗大量的无线资源、消耗大量的终端能量、引入较大的时延，对于机器型终端的场景，这些信令交互导致系统的资源利用率较低，也限制了可支持的终端数量。因此，对于机器型终端的场景，不需要或者只需要很少信令交互的非协调多址技术非常有应用前景。

因为没有协调信令，终端无法从网络获得任何传输方式的信息，所以非协调

多址技术中所有终端将使用相同的传输方式，比如编码调制、MIMO 传输、资源映射、波形等，终端之间只有信息比特是不同的，对应不同的编码码字，网络根据接收的码字进行译码得到终端的信息比特，通常信息比特内包含终端的数据格式头信息、身份信息和业务数据，由此，网络可以知道哪些终端发送了什么数据。

非协调多址接入技术有如下特点：

(a) 不需要网络的协调，因此节省了网络的协调信令资源开销，可以提升传输效率、支持巨量终端；

(b) 终端的接入信息（如 UE ID）作为数据的一部分进行发送，同时实现接入过程和数据传输过程，因此降低了时延；

(c) 通过编码实现多址，理论上可容纳的终端数量比正交资源实现多址所容纳的终端数量大很多；

(d) 终端之间不需要时间同步，实现过程简单。

非协调多址接入技术，先后出现了多种可实现的方案，包括：

- 级联码^[14]，用 BCH 码级联 LDPC 码实现近似高斯随机编码，性能与理论边界相差较远；6G 中可以进一步研究内码和外码的选项，比如内码用 sparse regression code (SPARC)，或 Hardamard 码等。
- 压缩感知^[15]，使用 SC-LDPC 进行编码，使用（基于部分信息比特的）交织方式区分用户，把交织方式经过压缩感知映射为前导码，级联 SC-LDPC 编码和前导码形成子块，子块通过 coded slotted Aloha (CSA) 发送；6G 中可以进一步研究区分用户的方式，比如空间区分、比特加扰区分和符号扩频区分等。
- 耦合的压缩感知^[16]，把信息比特分成多段，每段的校验比特是针对之前所有信息比特生成的，每段经过压缩感知编码，先后发送每段编码比特；6G 中可以进一步研究多个分段的耦合方法以提高译码性能，比如编码比特的网格图等。

- 稀疏的压缩感知^[17]，使用 LDPC 进行编码，进行编码的（基于部分信息比特的）重复、填充 0、使用（基于部分信息比特的）交织方式区分用户，把交织方式经过压缩感知映射为前导码，级联交织比特和前导码后发送；6G 中可以进一步研究区分用户的方式，比如编码码率区分等。

其中，级联码方案，是最简单的一种巨址接入技术，如图 22 所示：

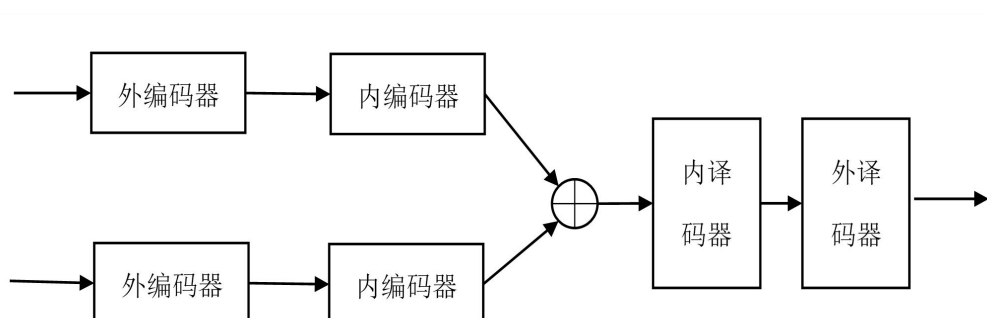


图 22. 巨址接入技术的级联码方案

级联方案的设计思路是较为直接的，由于用户码字的发送采用非协调机制，同一资源上存在叠加碰撞，构成一个二元加法信道(Binary Adder Channel, BAC)，因此用户信息载荷首先进入外编码器，编码后使接收机能够恢复参与模 2 加的各个用户各自的消息。外编码器的输出码字进入第二级编码器即内编码器，用以对抗信道中的噪声，使接收机能够恢复模 2 加的和，内编码器输出的码字在信道上叠加。级联编码器对用户信息进行一次性编码，所有用户使用同一种编码器。接收端需要两级译码，接收码字先送入内译码器，完成运算前传(Compute-and-Forward, CoF)阶段，再通过外译码器逆向恢复出叠加在一起的多用户各自的码字，即 BAC 阶段。

对多址接入技术感兴趣的读者，可以进一步参考 FuTURE 论坛同时发布的另外一本白皮书《演进的多址接入技术》^[18]。

3.7 AI 与通信结合提升终端用户体验

随着以深度学习为代表的机器学习在计算机视觉、图像处理、语音、自然语音处理等领域的突破，基于 AI 的智能通信被认为是 5G 之后无线通信发展的主流方向之一，其基本思想是将 AI 引入无线通信系统，实现无线通信与 AI 技术的有机融合，将 AI 用于信道估计、信号检测、信道状态信息反馈与重建、信道译码、端到端等无线通信模块，提升终端的用户体验，降低终端的复杂度。

6G 终端将成为连接物理世界与数字世界的桥梁，实现智慧感知、智慧控制、智慧服务。AI 在人类社会中的作用越来越突出，数字孪生、全息呈现等技术也对终端的存储和算力提出了更高的要求。空天地一体化终端通过随时随地的网络连接与云端协同合作，借助于高速的连接和高性能的终端侧智能处理，能够大大地提高终端的最佳体验。终端需要智能地进行传输资源的选择，接入网络选择，传输机制调整等操作，比如终端根据环境信息智能地选取接入网络获得最佳的服务。同时，由于个人隐私保护的驱动及 AI 处理器的快速发展，终端侧 AI 将逐渐成为未来的发展趋势之一。相比在云端运行的 AI，终端侧的 AI 技术在隐私性、可靠性、低延时、高效及个性化方面均有诸多优势。

3.7.1 终端友好的基于 AI 的通信技术

3.7.1.1 基于强化学习的波束成型提升终端鲁棒性

利用深度强化学习来实现智能化的波束成形，通过对位置、速率和其他环境与应用参数的感知来提升网络的稳健性与速率。使用 AI 技术优化毫米波系统中的波束赋形，基于深度学习的毫米波协调波束赋形方案能获得更高的系统有效可达速率，并且深度学习模型在 LOS (Line-of-sight) 环境和 NLOS (Non Line-of-sight) 环境下均有很好的性能表现，其能使终端快速适应多变的无线通信环境。

3.7.1.2 基于深度学习的链路自适应技术提升终端性能

基于深度学习的链路自适应，通过基于位置的无线干扰预测可使系统速率和

频谱效率得到改善；基于终端的 AI 推理可以降低原始数据需要在全网传输的负荷；基于 AI 的移动性管理，通过终端 AI 和传感器可以更好地预测网络切换行为与时机，能够在保留主要状态信息的前提下降低特征维度与计算复杂度。

3.7.1.3 基于深度学习的信道估计技术提升终端的通信能力

在无线通信中，从发送端传输到接收端的信号由于信道的影响会产生失真。因此，为了正确地检测发送的信号，在接收端需要进行信道估计，并对信号进行均衡处理。未来无线通信系统的用户规模和天线阵列规模将急剧增加，这将给传统的信道估计方法带来挑战。一方面，可用于准确估计信道的正交导频资源是有限的，并且非正交导频的使用将大大降低信道估计的准确性。另一方面，随着系统规模的增加，经典信道估计算法的计算复杂度也在增加。由于信道估计是从接收到的导频中推断出信道的过程，机器学习可以有效地解决此类问题。与传统的无线通信不同，使用 AI 的方法将信道估计和信号检测作为一个整体，直接使用 DNN 来实现从接收到的信号到原始信号的映射。在大规模 MIMO 毫米波情况下，信道估计极具挑战性，尤其是在天线阵列密集且接收机中 RF 链路受限的情况下。在噪声强度未知的情况下，DNCNN 降噪器可以有效地解决高斯降噪问题，从而提高了信道估计的准确性，增强了终端的通信能力。

3.7.1.4 基于深度学习的 CSI 压缩反馈技术

随着移动通信对通信速率和容量需求的不断提升，mMIMO (massive MIMO) 已经成为一项关键性技术。通过配置大量的天线，mMIMO 不仅在有限的频谱资源下极大的提升了信道容量，同时也拥有着很强的抗干扰能力。为了更好的利用 mMIMO 技术，发射端需要获取 CSI。在频分双工系统中，UE 端估计下行链路信道的 CSI，然后通过具有固定带宽的反馈链路将 CSI 反馈给 BS。然而，由于 mMIMO 的多天线属性使得 CSI 反馈的开销是巨大的，因此如何高效精确的反馈 CSI 仍然是一个严峻的挑战。

近年来随着深度学习的快速发展，深度学习已经被广泛应用到计算机视觉，语音信号处理和自然语言处理等领域。由于深度学习网络具有强大的并行计算，

自适应学习和交叉域知识共享等能力，因此深度学习方法也逐渐被应用在 CSI 压缩反馈领域来进一步减少 CSI 反馈开销，并且获得了很好的效果。

3.7.1.5 基于 AI 的信道编译码技术

目前深度神经网络运用在线性分组码的译码上，主要有两个切入点，一个是利用神经网络能量函数的极大似然法和线性分组码的软判决最大似然译码之间的联系进行译码，另外一个是基于神经网络分类特性进行译码。由于神经网络具有分类存储和联想记忆的特点，可以通过神经网络的训练将码字映射关系学习完后直接进行非迭代译码，同时也可以根据 tanner 图和能量函数构造出适合码字分类的神经网络。基于 DNN 的信道译码方法，得出了深度学习应用于信道译码的两个结论，一是如极化码等结构码比随机码更容易学习；二是针对结构码，深度学习网络能够译码没有训练过的码字。在传统极化码迭代译码算法基础上，目前有一种分离子块的深度学习极化码译码网络。该网络主要包含两个步骤：一是将原编译码分割成 M 个子块，然后分别对各个子块进行编码/译码，子块译码过程采用 DNN，性能接近 MAP 译码器的性能，子块的引入克服了码长过长造成的译码复杂度问题；二是利用置信传播译码算法连接各个子块，BP 算法与子块 DNN 连接实现并行处理。如图 23 所示，目前比较成熟的深度学习译码方法为将 CNN 与标准 BP 译码器串联，在噪声环境中估计信息比特。在接收端，接收到的信号首先由 BP 解码器进行处理以获得原始的解码结果，然后用接收信号与估计的传输符号相减获得信道噪声估计。由于存在解码误差，信道噪声估计具有较大误差。最后将信道噪声估计输入 CNN 以移除 BP 解码器的估计误差。标准 BP 接收机用于估计传输信号，CNN 用于降低 BP 检测器的估计误差，并且获得更加准确的信道噪声估计。BP 算法与 CNN 之间的迭代会逐渐提高检测 SNR，因此获得更好的译码性能，提升终端性能。

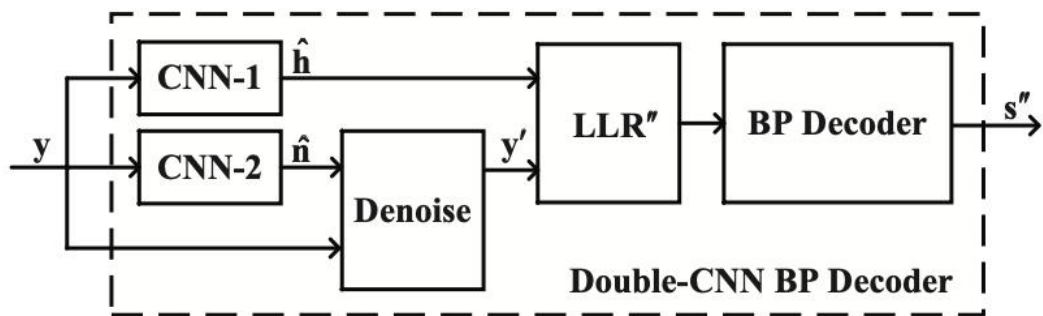


图 23. 基于 AI 的信道译码

3.7.2 终端友好的 AI 技术

3.7.2.1 基于深度学习的视频编解码技术

当前互联网上大于 75% 的流量都来自于视频, 5G 时代视频流量更是高达 90% 以上。用户对高清视频的需求不断增加, 比如高达 64K 分辨率的数字影院要求 256Gbps 的传输速率。因此高效地压缩、传输以及复原视频内容成为终端应用的关键。基于内容自适应的智能编码方案能满足终端的不同需求, 在实际环境中, 视频内容类型和画面复杂度多种多样, 传统在码率控制方式上以 VBR 或者 CBR 为主。内容自适应编码通过深入分析视频场景、复杂度、视频编码参数及视频质量的关系, 建立视频特征数据库。然后通过深度学习模型进行训练, 通过模型预测可以得到待编码的视频在一定视频质量下的最优编码参数, 从而获得较好的画面质量, 同时能显著降低传输文件的大小。

短视频场景下, 存在着大量的由于拍摄问题或者压缩问题带来的色彩灰暗、压缩噪点等低质量的视频, 而很多经典老片也存在胶片颗粒、划痕等问题, 非常影响人眼的主观感受。基于 AI 的画质修复和色彩增强, 在不增加额外带宽的前提下提升视频的显示效果。还可以利用深度学习技术将多帧相关信息去除压缩引起的噪声、块效应、伪影等, 利用周边质量较高的帧提升当前帧质量。通过运动估计网络, 经过运动补偿模块生成帧间预测信号, 输出主观增强的视频, 让画面看上去更漂亮, 从而提升终端显示的质量。

3.7.2.2 基于稀疏深度神经网络的轻量化 AI 技术

AI 在终端侧得到了广泛的应用，然而深度学习的计算和存储需求严重阻碍了其被大规模地部署于移动设备和嵌入式装置。轻量化 AI 技术通过移除神经网络中冗余通道的全部可训练参数和激活值，可以同时达到加速神经网络推理过程和压缩模型体积的效果，起到减少网络计算量的作用，移除的神经元及相应连接也不再存储，减少了模型的存储量。

使用网络剪枝技术找出这些冗余连接并将其移除，使其不再参与网络的前向或后向运算过程，起到减少网络计算量的作用。由于对神经网络进行通道剪枝后获得的是结构化稀疏的网络，因此不需要特殊的终端支持就可以获得对终端的加速效果。通过减少计算量，就可以降低不必要的存储和计算，从而降低终端的功耗。

3.7.2.3 分布式 AI 技术

分布式 AI 系统在数据、知识和控制等方面，在逻辑上或者物理上都是分布的，不存在全局控制和全局数据存储。系统中各路径和节点能够并行地求解问题，从而提高子系统的求解效率。而且在问题求解过程中，各个子系统和求解机构通过计算机网络相互连接，降低了求解问题的通信代价和求解代价。通过各个终端之间的各子系统协调工作，能够求解单个终端难以解决或者无法解决的困难问题。并且终端间通过网络互连和系统的分布，便于扩充系统规模，使系统具有比单个系统更好的开放性和灵活性。分布式 AI 系统的终端具有容错性，系统具有较多的冗余处理节点、通信路径和知识，能够使系统在出现故障时，仅仅降低响应速度或求解精度，以保持系统正常工作，提高工作可靠性。分布式 AI 系统的终端的独立性是因为系统求解任务归约为几个相对独立的子任务，从而降低了各个处理节点和子系统问题求解的复杂性，也降低了软件设计开发的复杂性。如图 24 所示，假设有一个多 GPU 集群系统，首先对终端进行拆分，将子终端分配到单节点上不同的 GPU，然后对数据进行划分，每个节点负责训练一部分数据，最后进行模型参数同步得到全局参数和全局模型。

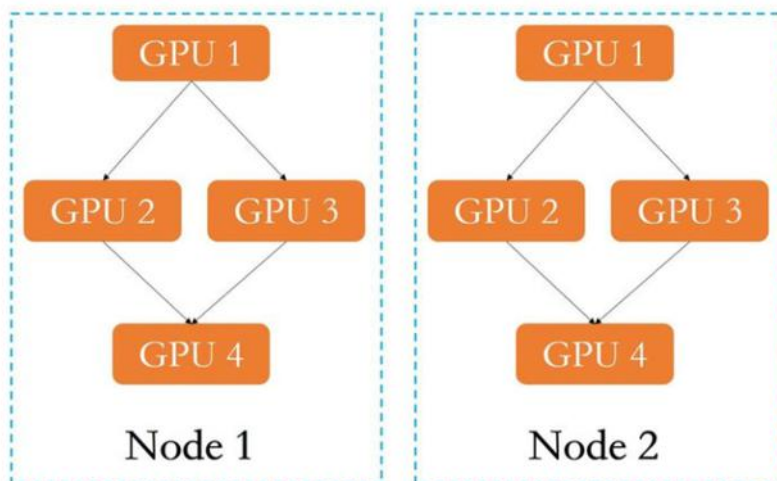


图 24. 低复杂度的协同多目标深度强化学习

协同多目标深度强化学习，能够借助多终端多目标的协同处理，降低单个终端运算负载。不同的智能终端实现各自的目标，同时为全局的成功做贡献。这种多目标多智能体的协同强化学习既要实现个人目标，又要为他人贡献力量。可以采用多目标多智能体的梯度策略，采用信用函数进行局部信用分配，使用一个函数增强方案来连接价值和政策函数的阶段。协同多目标深度强化学习能够同时实现不同目标，并且可根据用户需求和信道条件智能分配资源从而提高无线资源利用率并降低终端功耗。

3.7.3 基于无线 AI 技术的终端展望

面向未来广域泛在连接的通信终端，其通信资源、计算能力和存储空间有限，应用复杂的基于 AI 的无线通信算法会导致终端功耗和成本的上升。可以从两个方面进行提升：一、优化 AI 算法，降低对终端能力的需求；二、研究灵活的分布式协同 AI 算法。

优化 AI 算法的设计，降低对终端能力的需求。根据摩尔定律，一个集成电路中可容纳的晶体管数量每两年就会翻一番，而 Open AI 的研究结果表明，AI 算法演进效率有望超过硬件效率。未来的 AI 算法需要适配终端不同的硬件能力，来实现 AI 效能的提升。

研究灵活的分布式协同 AI 算法，将 AI 算法在设备和网络间或终端间进行协作是未来发展的一个技术方向。终端设备与网络协作实现 AI 算法是将计算密集

型、能源密集型部分卸载到网络端点，而将隐私敏感和延迟敏感部分留在终端设备上。设备将操作/模型执行到特定的部件/层，并将中间数据发送到网络端点。网络端点执行剩余的部分/层，并将推理结果反馈给设备。模型的训练需要终端与网络共同完成，因此终端和网络需要进行对模型的切割，整合和更新。针对终端、基站、MEC、云服务器间分割 AI 推理的增强技术以及支持分割 AI 推理和协作 AI 推理的新型系统架构是未来研究的重要方向。终端设备间协作实现 AI 算法：终端本身产生原始数据，聚合众多终端的数据，训练形成 AI 模型，并在终端中使用。对于多终端协同的应用场景，设计面向终端的联邦学习应用架构以及对终端、架构、功能或性能的新需求等方面是未来研究的重要方向。

4. 总结

在面向 6G 的物理数字融合世界中，终端将发挥重要作用。终端是构建数字世界的神经末梢，是物理世界与数字世界相互作用的媒介，并将提供物理与数字世界融合服务。终端的体积、功耗、成本和复杂度的限制，接入场景的限制，功率效率限制等，将影响其在物理世界触达的深度和广度，从而直接决定了数字化世界的水平和运作效率，直接影响用户体验。因此，面向 6G，我们需要在终端友好的新技术和对应的协议设计上多做文章，为终端减负。终端友好的关键技术包括：卫星与地面融合技术与多频段融合技术支持终端的广域泛在接入，终端原生组网支持终端灵活的接入，通感算融合扩展终端的服务能力，Cell free 技术支持终端 ‘0’感知的移动性体验，Backscatter 和近零功耗接收机支持终端 ‘0’功率通信，新型多址接入支持终端的免调度传输和上行异步传输，以及 AI 与通信结合提升终端用户体验。我们希望这些终端友好关键技术能支持终端去更好的满足未来的 6G 场景与需求，改善用户体验，助力未来数字世界与物理世界的高度融合和高效互动，提升人类幸福度。

5. 参考文献

- [1] 2030+愿景与需求白皮书（第二版），中国移动通信有限公司研究院，2020 年 11 月
- [2] Expanded 6G vision, use cases and societal values, Hexa-X, Deliverable D1.2, 2021 年 4 月
- [3] 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书, IMT-2030（6G）推进组, 2021 年 6 月
- [4] 6G 愿景、需求与挑战, vivo 通信研究院, 2020 年 10 月
- [5] Cell and user virtualization for ultra dense network, IEEE PIMRC 2015, Yu-Ngok Ruyue Li, Peng Hao, Feng Xie, Huahua Xiao, Min Ren
- [6] 算力网络白皮书, 中国移动通信集团有限公司, 2021 年 11 月
- [7] Study on User Equipment (UE) power saving in NR, 3GPP TR 38.840 V16.0.0 (2019-06)
- [8] 崔子琦,王公仆,魏旭昇,等. 反向散射通信的未来应用与技术挑战[J]. 移动通信, 2021 年,45(4): 29-36.
- [9] 零功耗通信, OPPO 等, 未来移动通信论坛, 2022 年
- [10] A -76dBm 7.4nW Wakeup Radio with Automatic Offset Compensation, Jesse Moody et al.
- [11] A -97dBm-sensitivity interferer-resilient 2.4GHz wake-up receiver using dual-IF multi-N-Path architecture in 65nm CMOS, Camilo Salazar et al
- [12] 3GPP TR 38.812 V16.0.0, Dec. 2018.
- [13] Y. Polyanskiy, "A perspective on massive random-access," in Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Jun. 2017, pp. 2523–2527.
- [14] O. Ordentlich and Y. Polyanskiy, "Low complexity schemes for the random access Gaussian channel," IEEE Int. Symp. Inf. Theory - Proc., pp. 2528–2532, 2017.
- [15] A. Vem, K. R. Narayanan, J. Chamberland and J. Cheng, "A user-independent successive interference cancellation based coding scheme for the unsourced random

access Gaussian channel," in IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 12, pp. 8258-8272, Dec. 2019.

[16] V. K. Amalladinne, A. Vem, D. K. Soma, K. R. Narayanan, and J.-F. Chamberland, "A coupled compressive sensing scheme for uncoordinated multiple access," arXiv preprint arXiv:1809.04745, 2018.

[17] A. Pradhan, V. Amalladinne, A. Vem, K. R. Narayanan, and J.-F. Chamberland, "A joint graph based coding scheme for the unsourced random access Gaussian channel," Online Available: <https://arxiv.org/abs/1906.05410v1>.

[18] 演进的多址接入技术，中信科移动等，未来移动通信论坛，2022 年

6. 缩略语

英文缩写	英文全称	中文全称
6G	The sixth generation mobile communication systems	第六代移动通信系统
IMT	International Mobile Telecommunication	国际移动通信
XR	Extended Reality	扩展现实
AI	Artificial Intelligence	人工智能
GEO	Geosynchronous Orbit	地球同步轨道
VSAT	Very Small Aperture Terminal	甚小孔径终端
CPE	Customer Premise Equipment	用户端设备
DVB-RCS	Digital Video Broadcast - Return	数字视频广播-经由卫

	Channel Satellite	星的回传信道
NR	New Radio	新空口
FR	Frequency Range	频率范围
G/T	Antenna Gain to System Noise Temperature Ratio	天线增益与系统噪声性能 的等效噪声温度
NTN	Non-terrestrial networks	非地面网络
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统
GaAs	Gallium arsenide	砷化镓
GaN	Gallium nitride	氮化镓
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	互补金属氧化物半导体
SiGe	silicon-germanium	锗硅
SOI	Silicon-On-Insulator	绝缘衬底上的硅
RF	Radio Frequency	射频
PA	Power Amplifier	功率放大器
LNA	Low Noise Amplifier	低噪声放大器
PCB	Printed Circuit Board	印制电路板
SIP	System In a Package	系统封装

GPS	Global Positioning System	全球定位系统
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System	微电子机械系统
QoS	Quality of Service	服务质量
RAT	Radio Access Technology	无线接入技术
CA	Carrier Aggregation	载波聚合
DC	Dual Connectivity	双连接
TRP	Transmission and reception point	发送和接收点
D2D	Device-to-Device	设备到设备
KPI	Key Performance Indicator	关键性能指标
QoE	Quality of Experience	体验质量
EEG	Electroencephalography	脑电特征波
JND	Just Noticeable Distortion	最小可觉失真
HEFT	Heterogeneous Earliest Finish Time	异构最早完成时间
SLA	Service-Level Agreement	服务等级协议
DCGW	Distributed computing gateway	分布式计算网关
eDRX	Extended Discontinuous Reception	扩展不连续接收

PSM	Power Saving Mode	节能模式
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access	非正交多址接入
PDMA	Pattern division multiple access	图样分割多址接入
LDPC	Low Density Parity Check Code	低密度奇偶校验码
DNCNN	Denoising Convolutional Neural Network	降噪卷积神经网络
DNN	Deep Neural Networks	深度神经网络
CNN	Convolutional Neural Networks	卷积神经网络
MAP	Maximum a posteriori	最大后验概率
BP	Belief Propagation	置信度传播

7. 贡献人员

维沃移动通信有限公司：姜大洁，秦飞

紫光展锐（上海）科技有限公司：李忻，丁敬峰

中国移动研究院：潘成康

中信科移动：白伟，张钰婕

北京小米移动软件有限公司：池连刚，庞博文

中兴通讯股份有限公司：谢峰，戴博，王菲，刘汉超

西安电子科技大学：任智源，王晨

