

技术白皮书

5G新空口

物理层介绍

目录

引言

物理层设计注意事项

用于5G NR的波形

灵活的子载波间隔和符号长度

NR参考信号

MIMO

用于5G的毫米波

Bandwidth Part

结论: LTE和5G NR PHY比较

词汇表

引言

如果要理解5G无线技术影响最大的三个广泛用途(图1),可以想象一下几年后上班族开着5G联网汽车上下班的场景。汽车会不断与附近的车辆、周边的高速公路基础设施和交通控制中心交换位置、行为和系统状态信息。如果能够快速可靠地实现这些,将可增强汽车对周围环境的感知,允许驾驶员将转向、加速和制动操作交给汽车的半自动驾驶系统,自己则可专心开电话会议。

当驾驶员的团队在努力找出涡轮机故障的根本原因时,驾驶员则可戴上增强现实(AR)设备,屏幕上就会出现飞机涡轮机的无线4K视频馈送以及传感器数据和仪表读数。该团队与位于三个不同国家的一组工程师进行实时协作,指导技术人员隔离其中一个组件并推荐故障分析步骤。

几分钟后,当智能高速公路出口出现时,驾驶员可以重新控制汽车,切换到低带宽的纯语音连接,并开到工作地点。汽车将引导他到离他最近且配有充电站的可用停车位。该地点的停车传感器在检测到这辆汽车后会更新网络上的停车位信息。当汽车插入充电时,充电终端会建立一个低速率连接来验证其帐户并处理付款。

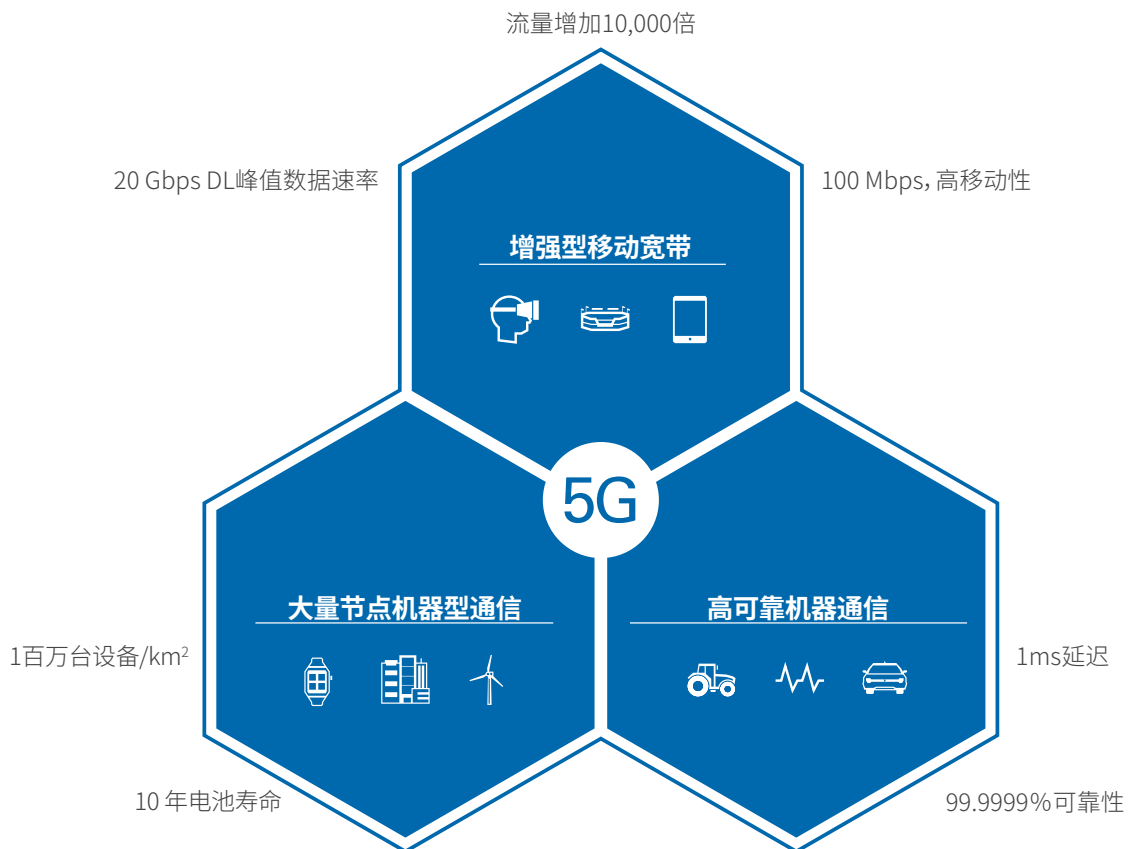


图1. 5G用例和关键性能指标预期

增强型移动宽带(eMBB)旨在显著改善移动宽带接入的数据速率、延迟、用户密度、容量和覆盖范围,即使在智能高速公路等较为拥挤的环境中,也能够实现AR/VR应用的实时数据流传输。超可靠的低延迟通信(URLLC)使用户和设备能够以最低延迟与其他设备进行双向通信,同时保证高网络可用性。最后,大规模机器通信(mMTC)使得许多低成本、低功耗、长寿命的设备可以支持嵌入式高速传感器、停车传感器和智能电表等应用。

这些不同的应用场景各有其要求,这就需要技术人员对技术进行权衡,做出明智的设计决策。为了保证5G的互操作性和全球接入,国际电信联盟(ITU)这个由电信行业参与者、国家和地区标准开发

组织、监管机构、网络运营商、大学和研究机构共同组成的国际联盟，必须批准5G技术标准。ITU-R(无线电通信部门)、ITU-T(电信标准化部门)和3GPP(第三代合作伙伴计划)正朝着统一的5G新空口标准共同努力。3GPP预计在2018年6月之前完成第1阶段, Release 15将重点关注eMBB和URLLC用例。大约在2019年底, 第二阶段将增加5G的功能, 以支持更多的服务、大型物联网部署以及52.6 GHz以上的更高频段。

目前, 标准组织已经在Release 14研究阶段达成了基本决定, 包括当前对NR非独立组网的关注, 这个阶段仅支持eMBB和URLLC用例。NR以现有4G基础设施、EPC(演进的分组核心网)和eNodeB作为主小区, 通过5G gNodeB(gNB)(基于双链接原理, 如图2所示)提供次级接入。

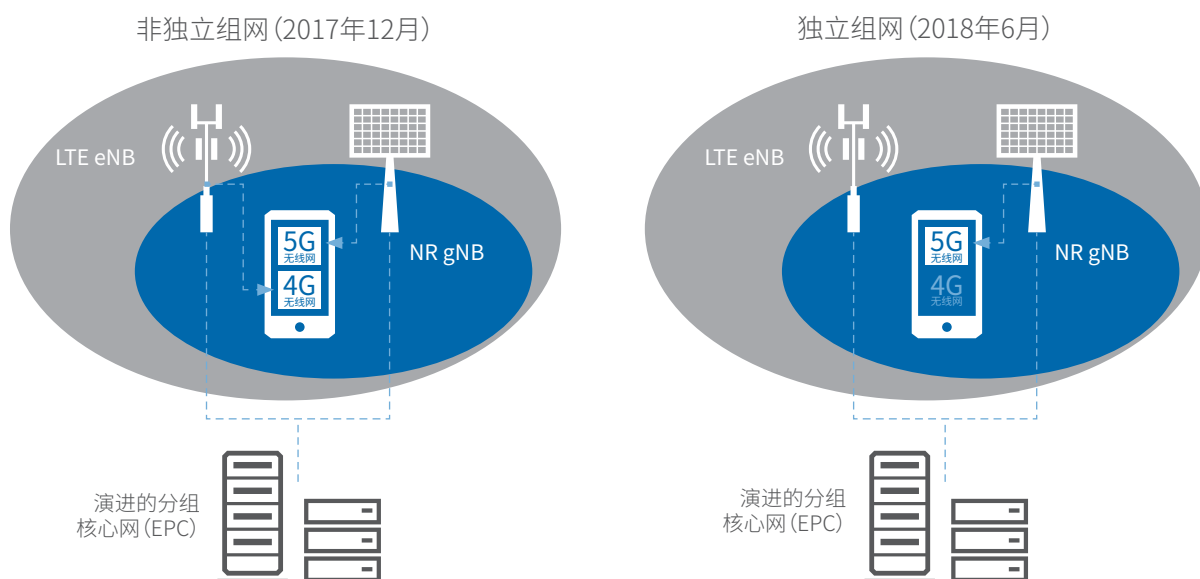


图2.非独立建网与独立建网

此外, IEEE制定了一个5G发展路线, 用于跟踪现有和新的IEEE技术为支持5G目标的未来发展方向, 包括802.11ax和802.11ay(WLAN)、802.15(短距离技术)和802.22(固定无线宽带)。

需要牢记的一点是, R15与4G标准兼容。这与当初4G标准(LTE)脱离3G无线标准(UMTS)类似。然而, NR标准的制定者计划在未来的5G版本中保持与最初5G NR规范的兼容性。由于制定者、行业专家和市场尚未定义5G技术所有可能的新用途, 5G物理层需要具备灵活性。本白皮书概述了支持eMBB和URLLC的关键5G目标应用所需的5G物理层及其实现。

物理层设计注意事项

来自工业界和学术界的许多研究人员正在积极致力于解决实现稳定可靠的5G网络所面临的挑战。以下关键特性在5G NR物理层中发挥了决定性作用:

- 支持广泛的工作频段, 以及这些工作频段包含各种信道带宽和多个部署选项。
- 为应用提供超低延迟服务, 这需要关键性传输具有短子帧和抗短突发干扰功能。
- 动态共享频谱以提供上行链路(UL)、下行链路(DL)、侧链路(Side Link)和回程链路。
- 实现多天线技术(多输入、多输出或MIMO), 以提高频谱效率。
- 保持紧密的时间操作和更高效的频率使用, 以实现更好的时分双工(TDD)和频分双工(FDD)部署。
- 要求DL和UL对称, 使得小型低成本的基站能够在毫米波频率下运行。

用于5G NR的波形

CP-OFDM:下行链路和上行链路

最近,研究人员一直在研究多种不同的多载波波形,并提出5G无线电接入方案。然而,由于正交频分复用(OFDM)方案非常适用于TDD操作和时延敏感的应用,加上该方案能够有效地处理大带宽的信号,在商业应用上已有诸多成功案例,所以循环前缀(CP)OFDM成为首选为NR。CP-OFDM的强大优势使其非常适合用于实现5G网络:

高频谱效率 - OFDM接入的这一基本特性有助于满足极端数据速率需求,特别是对于回程链路。此外,在未来的应用中,比如密集城市环境中的车辆通信,高频谱效率将有助于解决许多用户周期性异步传输时的容量限制问题。

MIMO兼容性 - 基站和移动设备都将利用MIMO技术实现单用户MIMO和多用户MIMO(MU-MIMO)的空间和频率复用。MIMO部署还可以克服高传播损耗问题并通过波束成形扩展覆盖范围。

相位噪声抑制 - 随着工作频率(以及振荡器相位噪声)的增加,OFDM系统可以通过增大OFDM的子载波间隔(SCS),最小化由于相位噪声引起的符号间干扰。

收发器的简易性 - 与标准制定者考虑用于5G部署的其他波形相比,OFDM收发器实现起来较为简单。基于多年的OFDM设计经验,无线行业的工程师意识到由于业界对OFDM工作原理的深入理解及其广泛的商业部署,OFDM可以让5G设备以较低的成本实现强大的OFDM基带处理。

信道时间和频率选择性抑制 - 通过正确选择SCS和工作频率,OFDM系统可以在短于信道相干时间的时间内完成设备之间的传输,并实现高移动性(高速)和高数据速率应用,同时最大限度地减少时间选择性的影响。另外,如图3所示,基于信道估计和均衡技术,OFDM波形对频率选择性信道具有很高的弹性。

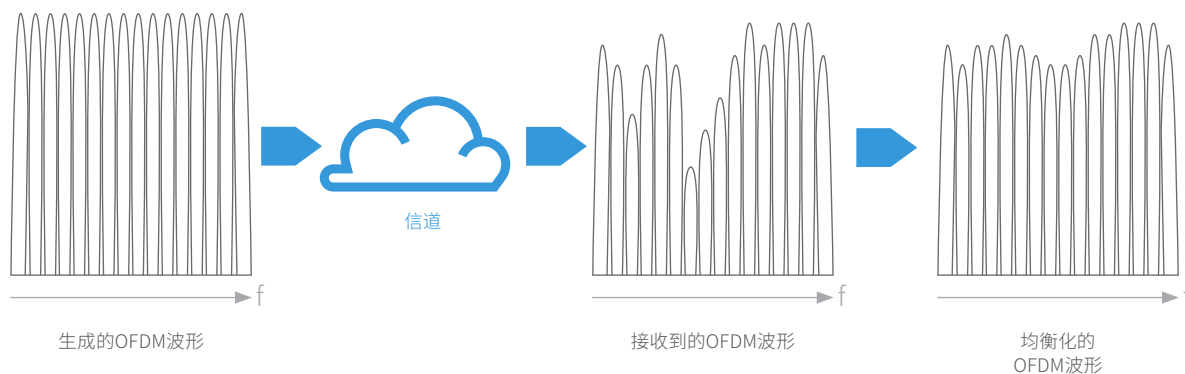


图3. OFDM波形的频率选择性抑制

定时误差和符号间干扰电阻 - 由于CP(循环前缀)的缘故,接收器可以更好地容忍同步误差,并防止先前的OFDM符号干扰当前接收的OFDM符号。图4显示了两个之后接收到的OFDM符号,每个符号都有一个专用的CP。每个OFDM符号开始处的CP包含OFDM符号末尾的副本。接收机解调信号时,是对CP(FFT窗口)之后的符号进行操作。该机制可防止相邻OFDM符号之间出现符号间干扰。

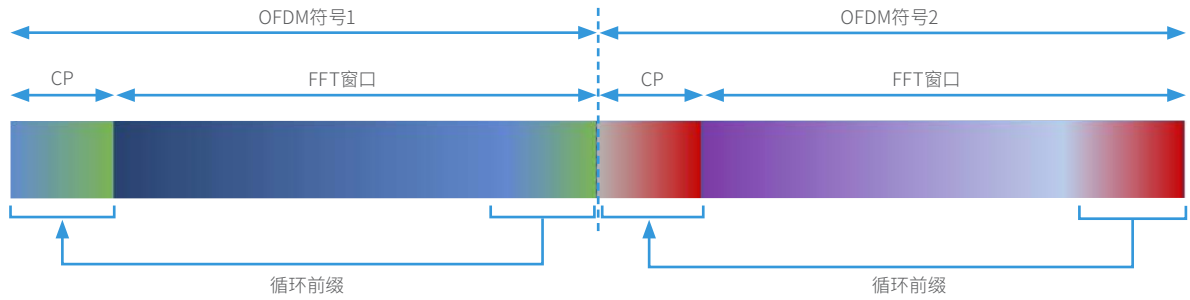


图4.通过循环前缀分隔OFDM符号

利用CP-OFDM, 用户设备 (UE) 支持以下调制方案:

- QPSK
- 16- QAM
- 64- QAM
- 256-QAM

DFT-S-OFDM: 更高效率的上行链路

OFDM波形的主要缺点之一是峰值平均功率比 (PAPR) 较高, 这会降低发射机上RF输出功率放大器的效率, 无法最大程度地降低高阶非线性效应。对于智能手机等UE来说, 最重要的两点是维持电池寿命和降低能耗。在移动设备中, 射频功率放大器负责将信号传输到基站, 因而该器件消耗的功率最大, 因此系统设计人员需要一种波形类型, 既可以让放大器高效运行, 同时又能够满足5G应用的频谱需求。尽管单载波波形的PAPR很低, 能够提高功率放大器的效率, 但却无法提供高频谱效率和动态频谱利用率, 而且与MIMO系统的兼容性较低, 并易受频率选择性信道的影响。

对于上行链路, NR允许UE使用CP-OFDM或离散傅里叶变换扩频的正交频分复用 (DFT-S-OFDM) 的混合波形。在DFT-S-OFDM中, 发射机使用相同的数据调制所有子载波。图5的右侧显示了第一组子载波 (红色) 占用的带宽与左边的OFDM符号相同。DFT-S-OFDM调制器将相同的数据映射到所有子载波, 但持续时间较短。然后再将下一个数据符号 (绿色) 映射到所有子载波, 持续时间仍然较短。经过等效于OFDM符号时间长度的时间后, 发射机将数据符号同时映射到所有子载波, 但发送间隔较短, 发送的数据量与OFDM波形一样。这种DFT-S-OFDM波形不仅具有较低的PAPR, 而且也提供与OFDM相同的多径干扰恢复能力和灵活的子载波频率分配。

PAPR: 11-13 dB

更高的效率和更低的PAPR: 6-9dB

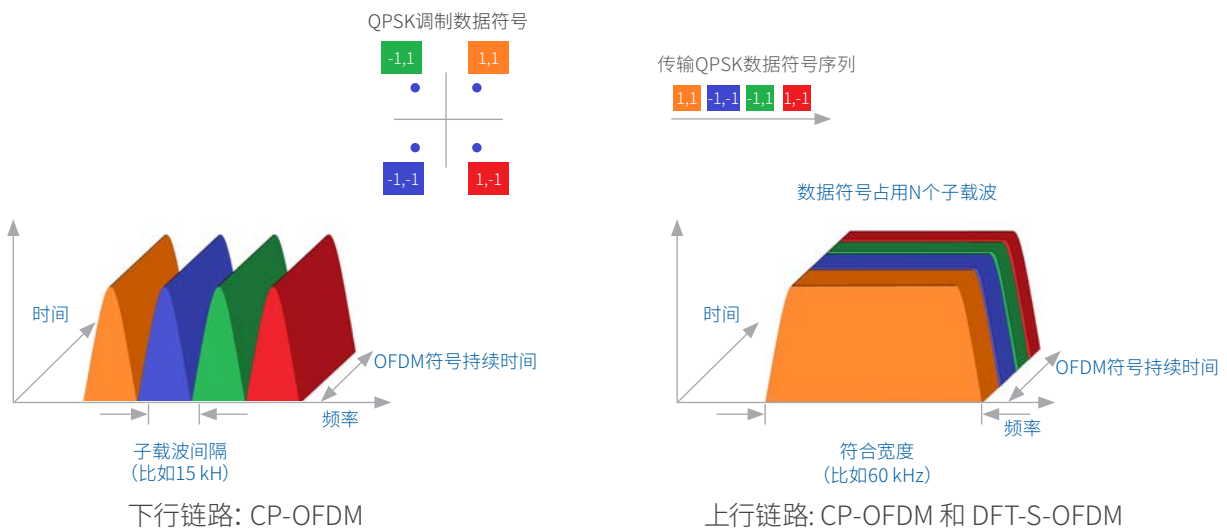


图5. OFDM与DFT-S-OFDM

利用DFT-S-OFDM, UE支持以下调制方案:

- Pi/2-BPSK——注意这是NR中的一种新的调制方案, 并且它需要新的IP才能实现
- 16- QAM
- 64- QAM
- 256-QAM

灵活子载波间隔和符号长度

3GPP期望NR能够在多个频带中工作, 包括从现有蜂窝频带 (低于1GHz) 到3GHz和5GHz之间的更宽频带以及高达毫米波区域的频谱。图6所示的是当前定义的高于6.6GHz的NR工作频带。

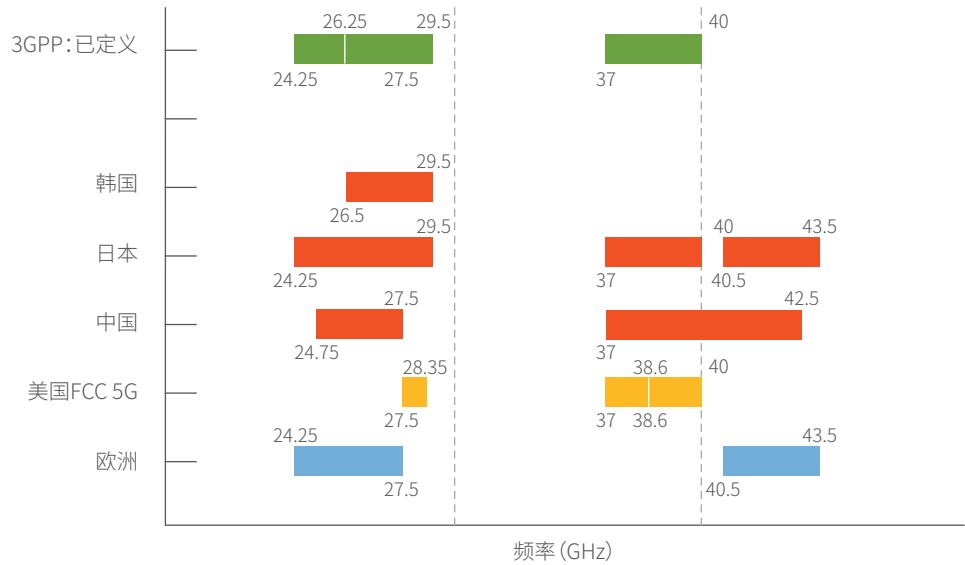


图6. 频谱的毫米波部分中, 3GPP定义和本地采用的NR工作频带

随着载波频率的增加, 系统相位噪声也会增加。例如, 在图7的载波相位噪声图中, 1GHz和28GHz的载波之间的相位噪声差约为20dB。由于LTE在毫米波频率下的SCS非常窄且固定不变, 而且符号持续时间短, 毫米波频率下相位噪声的增加使得接收机难以解调OFDM信号。

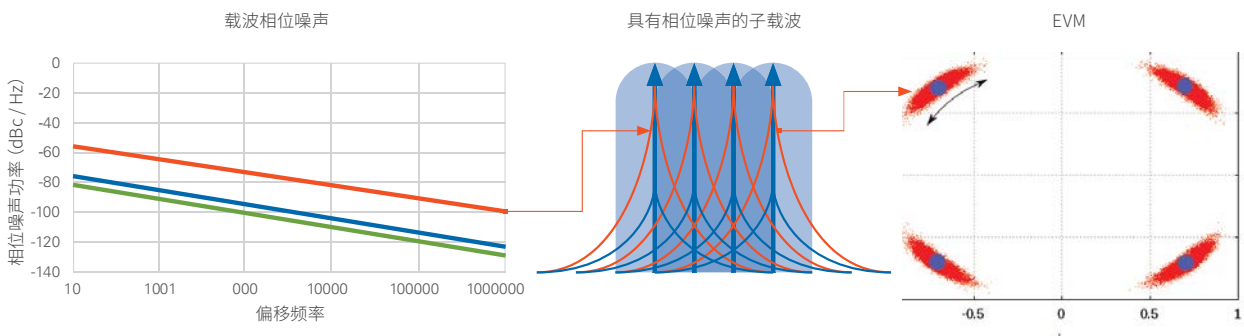


图7. 相位噪声对误差矢量幅度的影响

另外, 如图8所示, 多普勒频移随着载波频率而增加。例如, UE在28GHz的载波频率下以60km/h的速度移动时, 多普勒频移接近1500Hz, 即15 kHz子载波间隔的10%。由于信道相干时间或系统认为传输信道保持不变的时间与多普勒频移近似成反比, 因此随着移动速度的增加, 该时间减小。因此, 在更高的载波频率和更快的速度下, 系统可用于测量信道并完成单时隙传输的时间减少了。

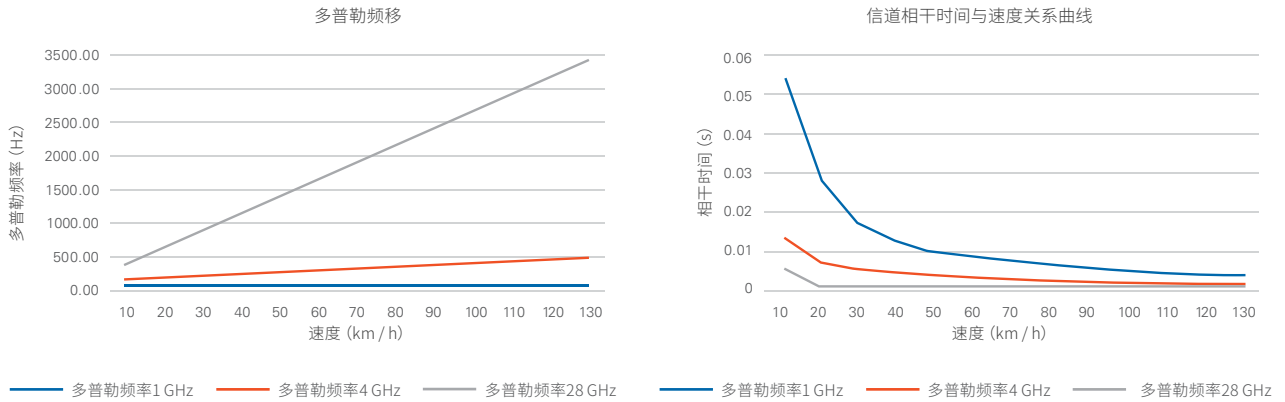


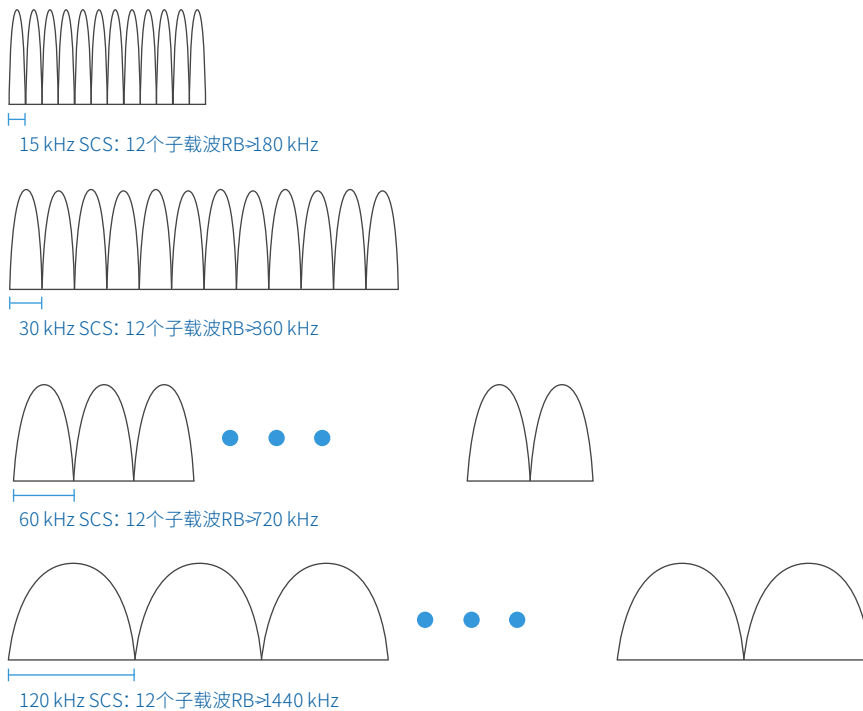
图8.多普勒频移和信道相干性

此外，相位噪声和多普勒频移决定了满足特定误差矢量幅度 (EVM) 标准的SCS要求。这意味着，由于相位噪声的原因，如果使用较窄的SCS，会导致EVM增大，除非系统设计人员使用高成本的高质量本地振荡器来实现该设计。而且，当SCS较小时，由于高速移动下的多普勒频移效应，系统性能可能会受到影响。另一方面，较宽的SCS会导致信道带宽过大。此外，考虑到SCS与OFDM符号持续时间成反比，随着SCS增加，OFDM符号和CP长度将缩短并且使系统更易于出现时延扩展。因此，SCS应该尽可能小，同时在存在相位噪声和多普勒的情况下提供足够的性能来实现所需的信道带宽。

在蜂窝标准中，“参数集” (numerology) 指的是物理层SCS和符号长度。3GPP对灵活的参数集 (numerology) 进行了标准化，从LTE的15kHz SCS开始，扩展了正交子载波之间的间隔。之所以利用已经非常成熟的LTE 参数集 (numerology) 标准，其中一个根本原因是在第一阶段部署期间，NR 部署能够与LTE网络共存并保持时间对齐。这可以让LTE用户逐渐接受新的技术。

NR 参数集 (numerology) 根据以下公式进行扩展：^{1,2}

$$SCS = 15 \cdot 2^\mu \text{ kHz}, \mu \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$$



*NR规范还包括240 kHz SCS。

图9.灵活的SCS

该标准规定最小可分配频率单元由12个子载波组成，称为物理资源块 (PRB)。因此，SCS越小，PRB越窄，如图9所示。

图10所示的是NR信道PRB和保护频段。

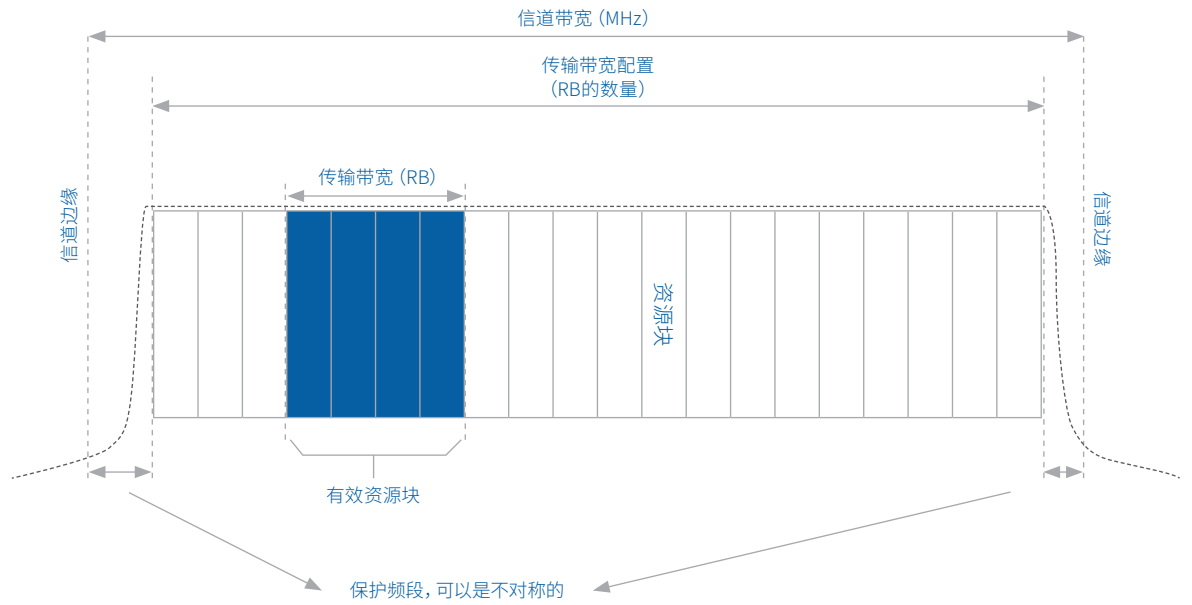


图10. NR信道按资源块进行分区

更具可扩展性和灵活性的框架结构

除了灵活的SCS, 5G NR还实现了灵活的框架结构, 确保5G的前向兼容性, 还可最大限度减少了设计取舍, 以支持一些关键特性, 如低延迟、与LTE共存、可变长度传输以及TDD和FDD在许可和未许可频谱中的操作。

时隙配置取决于SCS

NR时隙包含14个OFDM符号。在60 kHz SCS的特殊情况, NR时隙可以包含一个扩展CP和12个OFDM符号。由于OFDM符号持续时间与SCS成反比关系, 因此时隙的持续时间随着SCS的增加而减小。图11显示了标准的NR时隙配置。

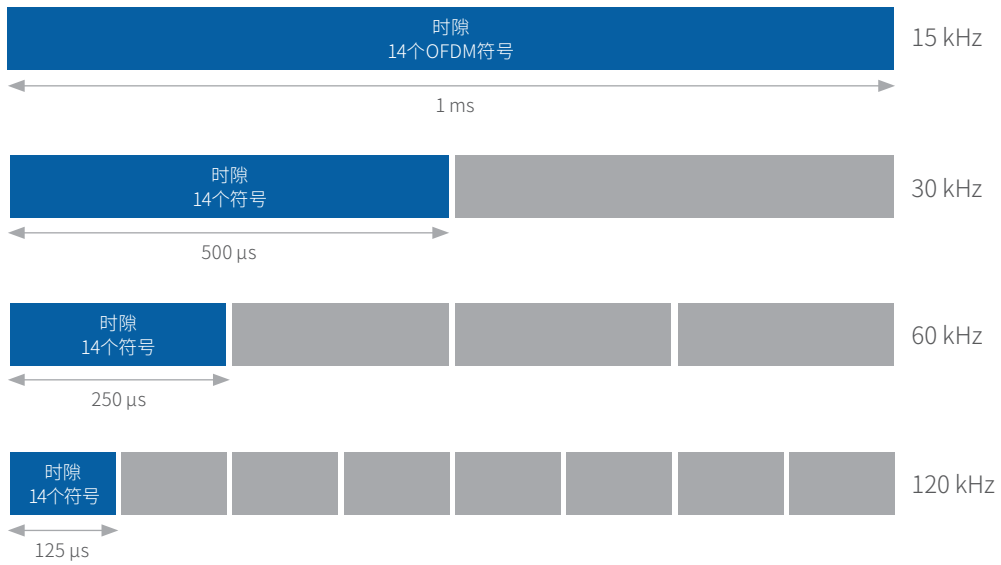


图11.基于TDD时隙的配置

帧结构对时隙进行编号并将它们分为一组组持续时间为1ms的子帧。10个1ms子帧形成完整的NR帧。每个帧内的时隙数量也随着所选择的参数集 (numerology) 而变化, 例如:

- 如果选择15kHz的SCS, 则每个子帧内只有一个1ms时隙, 因此每帧包含10个时隙
- 如果选择30kHz的SCS, 则每个子帧包含两个500μs时隙, 因此每帧包含20个时隙

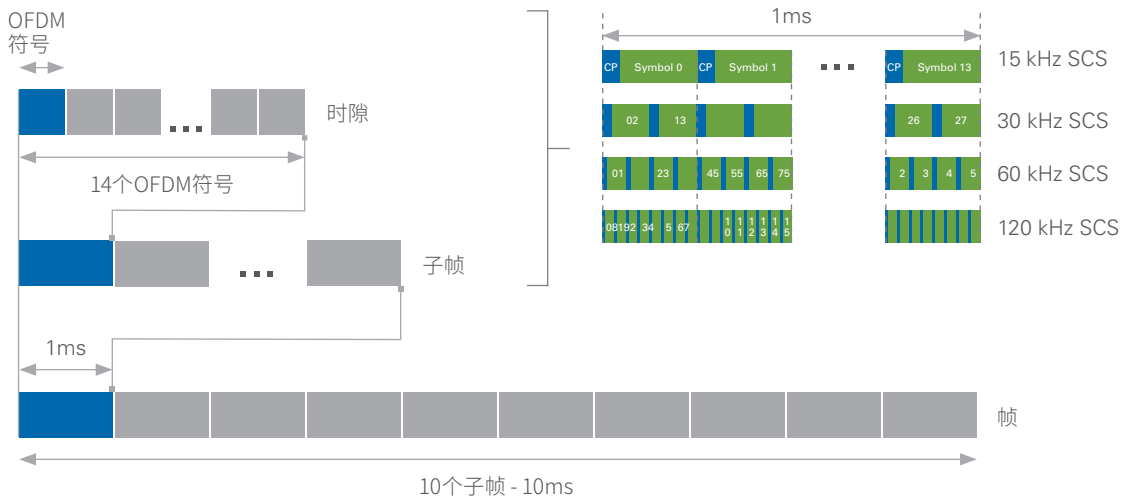


图12. NR帧结构

时间和频率资源结构决定了了图13所示的NR资源栅格。取决于SCS, 资源栅格随着可用子载波和OFDM符号的数量变化而变化。也就是说, 对于每个参数集 (numerology) 和载波, NR资源网络的宽度等于每个SCS资源块的最大值乘以每个资源块的子载波数量, 长度等于每个子帧的OFDM符号的数量。

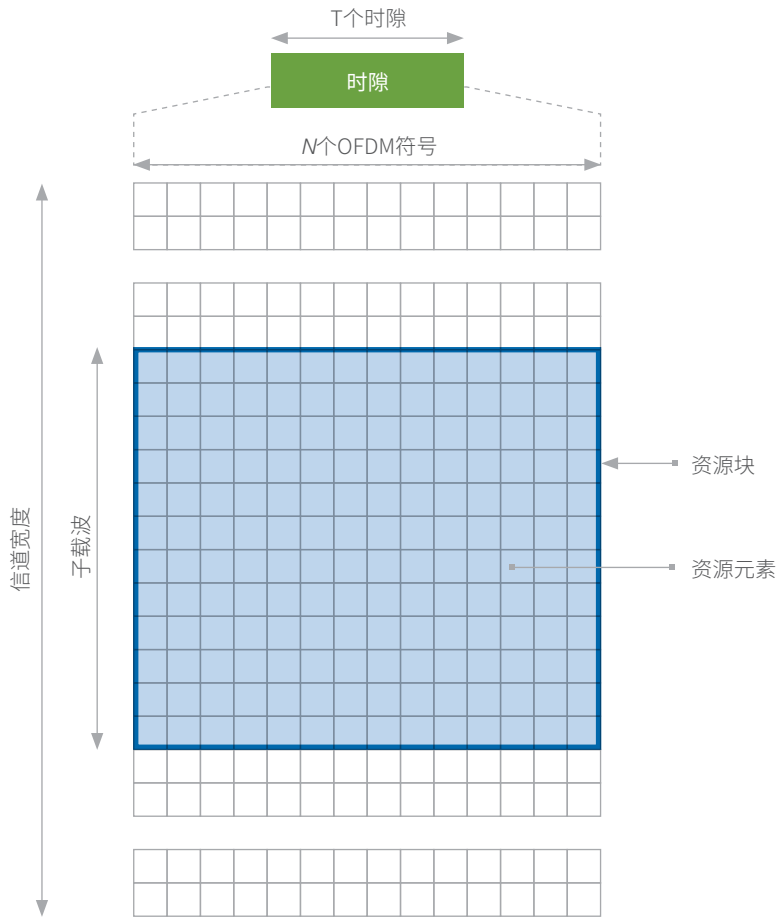


图13. NR资源栅格

为了能够高效、灵活地使用TDD资源, NR还采用了灵活的时隙结构。如图14所示, 系统可以将时隙分配为全部下行 (DL) 时隙、全部上行 (UL) 时隙或DL/UL混合时隙, 以支持非对称业务。上行控制发生在时隙开始时, 下行控制发生在时隙结束时。与LTE的DL/UL TDD配置一样, 系统可以静态地配置DL/UL时隙, 也可以动态地改变DL/UL的比例分配, 以获得更好的效率和基于业务需求的调度。

为了实现这一点, NR标准纳入了时隙格式指示符 (slot format indicator, SFI), 该字段用于告知用户OFDM符号是否包含DL、UL或灵活 (DL或UL) 时隙。SFI通过索引UE预配置表中的可能链路分配来指示一个或多个时隙的链路方向。

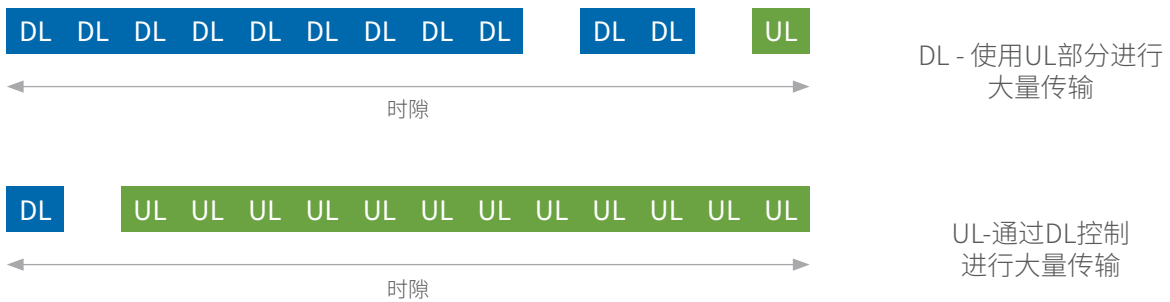


图14.用于动态管理TDD资源的灵活时隙结构

此外, 当系统需要处理非最紧急大型有效载荷时, 该标准可允许时隙聚合。例如, 对于eMBB用例, 聚合时隙和更长的传输时间满足了应用需求, 同时减少了TDD切换和信令开销。

mini-slot(微时隙)实现了进一步动态调度

NR标准还在考虑使用“微时隙”来支持突发性异步传输，其起始位置是可变的，持续时间比典型的14符号时隙更短。微时隙是最小的可调度单元，并且可以持续7个、4个或2个OFDM符号。微时隙对于实现低延迟传输尤为重要。

想象一下未来URLLC的应用场景，这类应用需要以最小的延迟传递其信息，因此标准的10毫秒帧对这类应用来说太长了。NR参数集(numerology) 可允许微时隙在不等待系统调度的情况下跳过现有帧。为了避免冲突，当网络检测到微时隙突发时，会以最高优先级处理URLLC设备。另外，网络可以提前调度微时隙，这对于毫米波操作越来越重要，因为在大带宽内只需传输几个OFDM符号就足以承载较小的有效载荷。截至2017年12月，3GPP尚未完全明确此功能，该功能将不会纳入到Release 15中。³

NR参考信号

为了提高协议效率，以及维持时隙或波束内的传输而不必依赖于其他时隙和波束，NR引入了以下四个主要参考信号。与LTE标准通过不断交换参考信号来管理链路不同的是，NR发射机仅在必要时才发送这些参考信号。⁴

1. **解调参考信号 (DMRS)** - DMRS因不同UE而异，系统使用该信号来估计无线电信道。系统可以对DMRS进行波束形成，将其保持在预定的资源范围内，并且仅在必要时进行上行或下行传输。另外，系统可以通过分配多个正交DMRS来支持MIMO传输。网络会尽早为用户提供DMRS信息，以满足低延迟应用所需的初始解码要求，但仅在偶然情况下才会将这些信息发送给信道基本保持不变的低速情况。或者，该信息也可用于追踪高速移动场景中的快速变化，这可能会增加传输速率(称为“附加DMRS”)。
2. **相位跟踪参考信号 (PTRS)** - 如前所述，发射机的相位噪声随着工作频率的增加而增加。特别是在毫米波频率下，PTRS起着至关重要的作用，因为它可最小化振荡器相位噪声对系统性能的影响。OFDM信号出现相位噪声会存在的一个主要问题是该噪声会成为所有子载波的共同相位旋转，称为共同相位误差(CPE)。NR系统通常将PTRS信息映射到每个符号的几个子载波，因为相位旋转对OFDM符号内的所有子载波产生同等影响，但是符号间的相位旋转相关性却很低。系统会根据振荡器的质量、载波频率、SCS以及传输使用的调制和编码方案来配置PTRS。
3. **探测参考信号 (SRS)** - SRS仅用于上行链路，由UE发送，用于帮助系统获得每个用户的信道状态信息(CSI)。该信息描述了NR信号如何从发射机传播到接收机，并显示散射、衰落和功率衰减与距离等的组合效应。系统使用SRS进行资源调度、链路自适应、大规模MIMO和波束管理。
4. **信道状态信息参考信号 (CSI-RS)** - CSI-RS仅用于下行链路，由UE接收，用于估计信道并将信道质量信息报告回gNB。在MIMO操作期间，NR基于载波频率使用不同的天线方法。在较低的频率下，系统使用适中的MU-MIMO有源天线并增加FDD模式。在这种情况下，UE需要CSI-RS来计算CSI并且通过上行链路进行报告。

MIMO

为了更高效地使用频谱并为更多用户提供服务，NR计划充分利用MU-MIMO技术。MU-MIMO利用多个用户之间不相关的分散空间位置来为MIMO增加多址(多用户)能力。在这种配置中，gNB将CSI-RS发送给覆盖区域中的UE，并且基于每个UE设备的SRS响应，gNB会计算每个接收机的空间位置。前往每个接收机的数据流会经过预编码的矩阵(W-Matrix)，矩阵将数据符号组合成信号，流向gNB天线阵列中每个元件⁵(见图15)。

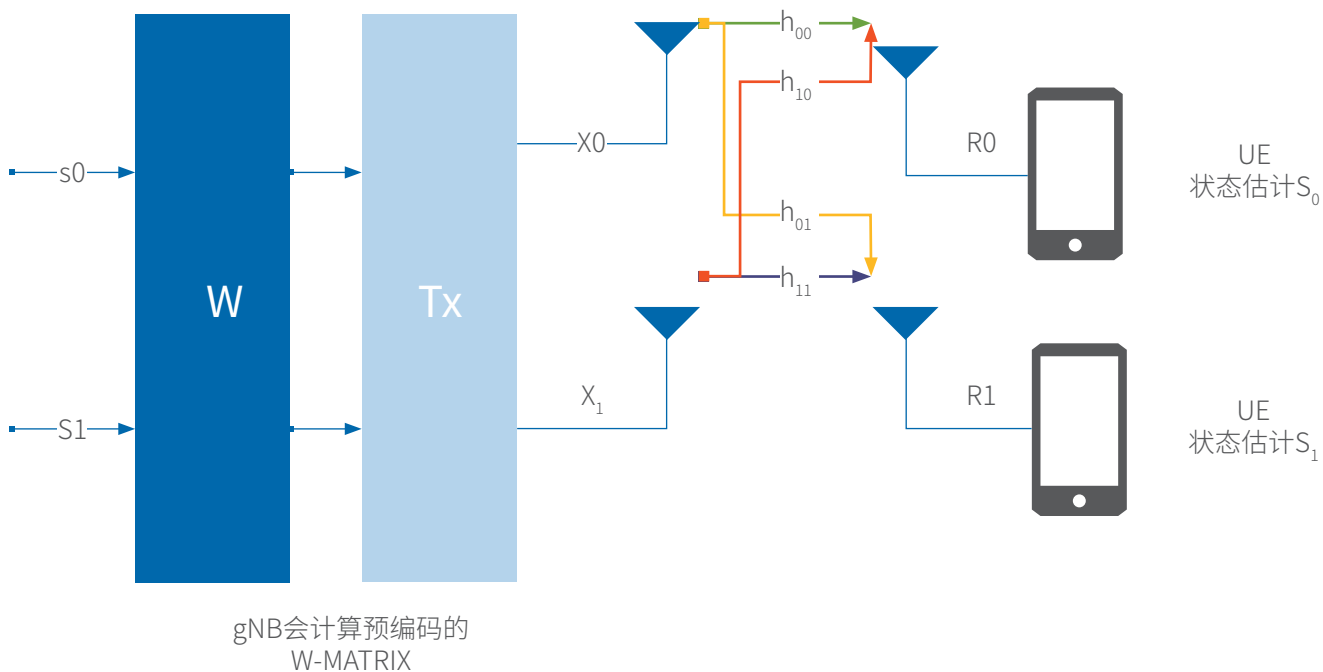


图15. DL上的MU-MIMO原理图

多个数据流拥有各自独立且适当的权重, 这些权重使每个数据流产生不同的相位偏移, 使得波形之间相长干涉, 并且同相到达接收机处。这将每个用户位置处的信号强度最大化, 同时最大限度减小其他接收机的方向上的信号强度(零值), 如图16所示。

gNB MU-MIMO天线阵列

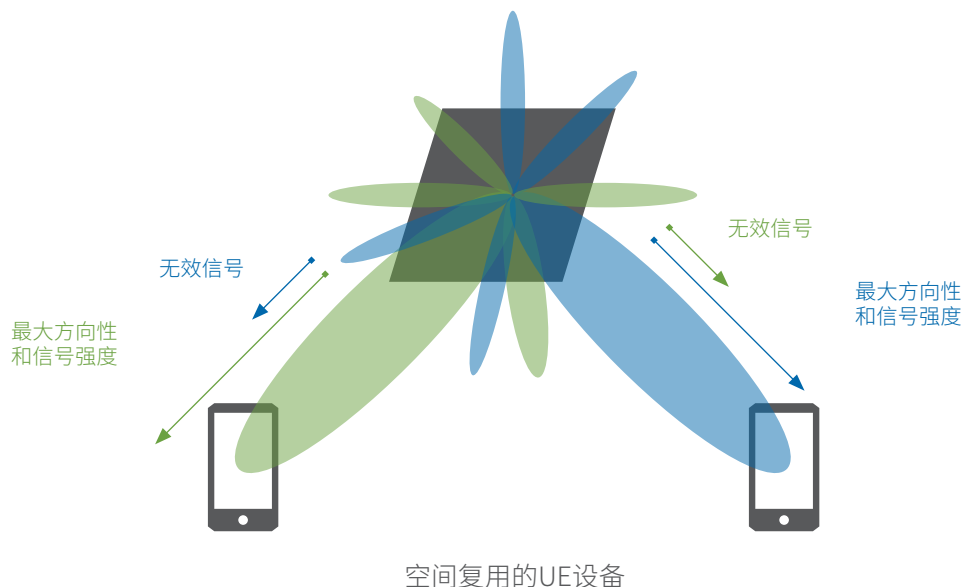


图16. 用于空间复用的MIMO波束成形

因此, gNB可独立或同时与多个UE设备进行通信, 有效地实现空间复用。另外一个优势是, 在这种MU-MIMO实现中, UE设备不需要任何关于信道的信息或额外处理即可获得数据流。

DL上的MU-MIMO增强了NR系统的容量。该容量取决于gNB天线数量的最小值以及UE设备数量的总和与每个UE设备的天线数量的乘积。换句话说，MU-MIMO可以利用gNB天线阵列和更简单的单天线UE设备实现MIMO扩容。

用于5G的大规模MIMO

MIMO方法可再进一步演变为大规模MIMO。当系统的gNB天线比每个信令资源的UE设备数量高出很多倍时，便可部署大规模MIMO配置。gNB天线的数量远高于UE设备时，频谱效率会大幅提高。与现在的4G系统相比，这种条件使系统能够在同一频段内同时为更多的设备提供服务（见图17）。NI与三星等行业领先企业携手，继续通过其软件无线电平台和用于快速无线原型验证的灵活软件展示大规模MIMO系统的可行性。

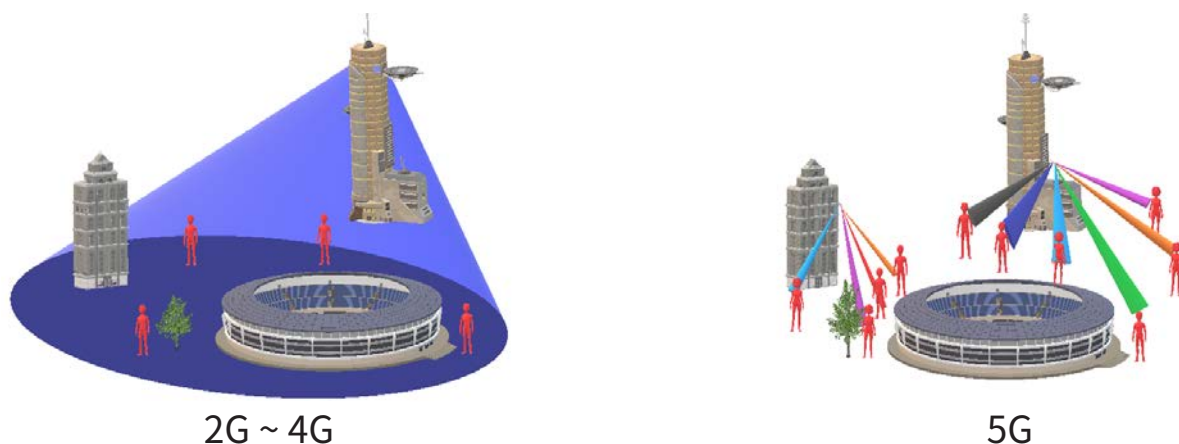


图17.大规模MIMO的多天线阵列

目前，大规模MIMO的主要研究焦点是低于6 GHz的频率。此范围的频谱非常稀缺，且价值非常高。在这些频段中，大规模MIMO系统可以通过空间复用多个终端来显著提高频谱效率。该系统还可以利用大型天线阵列增益来降低每个前端必须处理的能耗，从而提供卓越的性能。

在大规模MIMO系统中，每个天线都有其射频和数字基带链。gNB保持严密的相位控制并处理来自所有天线的信号。系统可以更全面地了解UL的信道响应情况，并利用数字处理功能快速响应信道的变化。大规模MIMO主要在TDD模式下运行，这提供了信道互异性假设所需的条件。这使得系统能够估计来自UL导频的DL信道，并且无需事先了解信道信息。

未来大规模MIMO系统的另一个优势是可以为覆盖区域内的所有UE提供更好且更一致的服务。由于链路预算的优化，加上将目标UE精确地放置在辐射波束内，同时将非目标UE无效化（空间分辨率）的能力，功率控制算法可以更公平地对待每个UE。

用户的移动可能会限制大规模MIMO解决方案在性能方面的扩展程度。为了正确估计信道，系统需要在UL方向上发送UL导频和有效载荷。UE移动越快，信道相干时间越短。例如，在UE快速移动的大型覆盖区域内，例如在高速公路上以120 km/h行驶的汽车时，信道在2 GHz载波频率下的相干时间降至1 ms左右。这要求系统每秒重新计算信道1000次才能跟踪移动的UE，使复用的优势只能局限在较少的终端。图18显示了相干时间如何随载波频率和UE速度的变化而变化。而在固定无线接入等很少移动或不移动的环境中，系统可以使用窄波束，通过空间复用来容纳数百个终端。



图18. 移动速度对信道相干时间的影响

用于5G的毫米波

工业和院校研究人员将可用的毫米波频段作为下一个前沿研究领域，以满足未来需要庞大数据的无线应用需求。运行在28 GHz及以上的新型5G系统为更多信道提供更多可用频谱，这非常适用于数Gbps的链路。尽管这些频率相比6 GHz以下的频谱较不拥挤，但是却会受到不同传播效应的影响，例如更高的自由空间路径损耗和大气衰减、室内渗透力弱以及衍射效果差。

为了克服这些负面影响，毫米波天线阵列可以聚焦其波束并利用天线阵列增益。幸运的是，这些天线阵列的尺寸随着工作频率的增加而减小，从而允许在与单个sub-6GHz元件相同的面积内容纳包含更多元件的毫米波天线阵列(图19)。

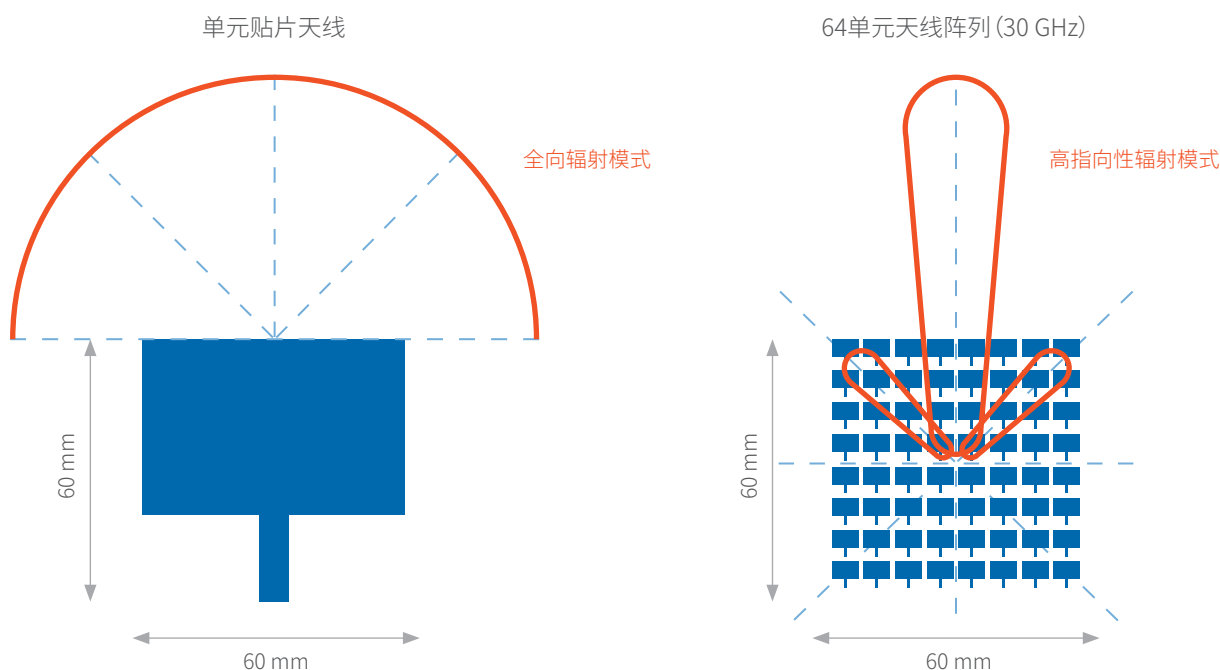


图19. 毫米波和sub-6GHz天线阵列比较

通过模拟波束控制简化复杂性

如上所述，大规模MU-MIMO系统需要比UE设备多得多的发射RF链路才能进行适当的空间复用。这与仅通过一个RF链馈送到多个天线的系统不同，在单RF链中，多个天线的相位通过类似的方式进行控制，以便聚焦和控制辐射方向(见图20)。对于MU-MIMO目的，这样的系统可以归类为具有方向性可控制天线的单天线终端。

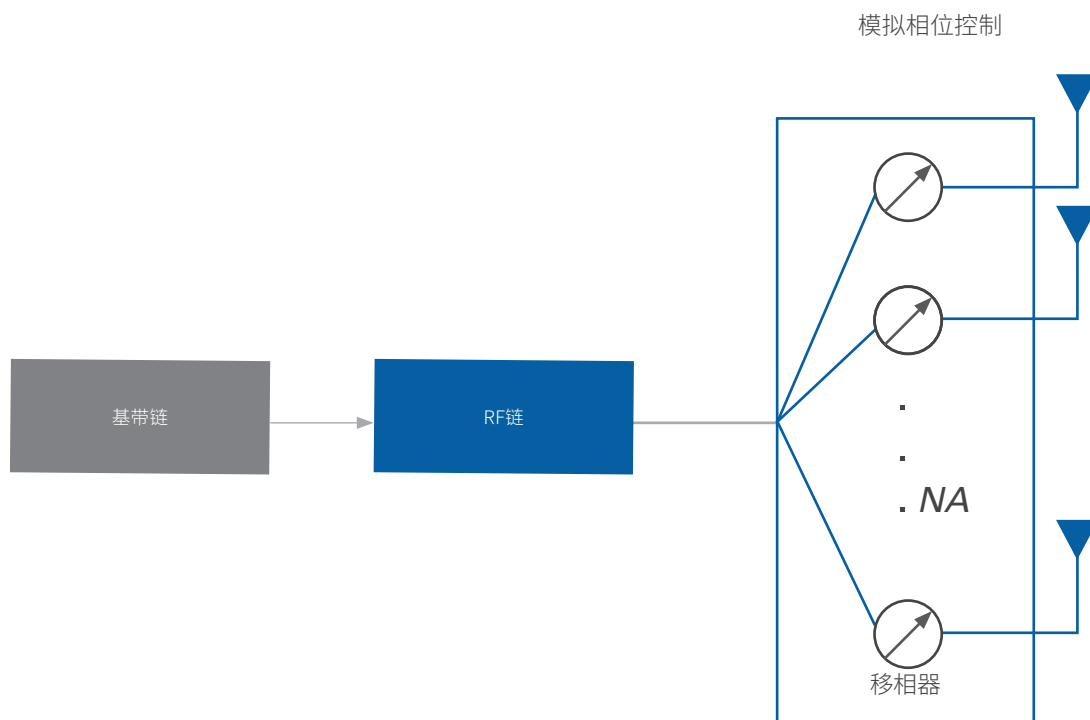


图20. 基于模拟波束控制的单RF链

大规模MIMO系统的主要缺点之一是集成和部署大量RF链非常复杂性,而且成本高昂,特别是在毫米波频率下。研究人员已经提出了几种混合(数字和模拟)波束成形方案⁶,以允许5G gNB在维持大量天线的同时,不断降低MU-MIMO的实现成本。图21展示了一个具有公共基带处理级的混合系统,该级将多个数据流馈送到其相应的RF链。这些数据流在进入模拟级之前会经过数字波束成形信号处理。在最后一级中,系统通过模拟移相器进行波束控制,将射频波束聚焦到特定方向。这使得空间复用的RF流包含在定向波束中。

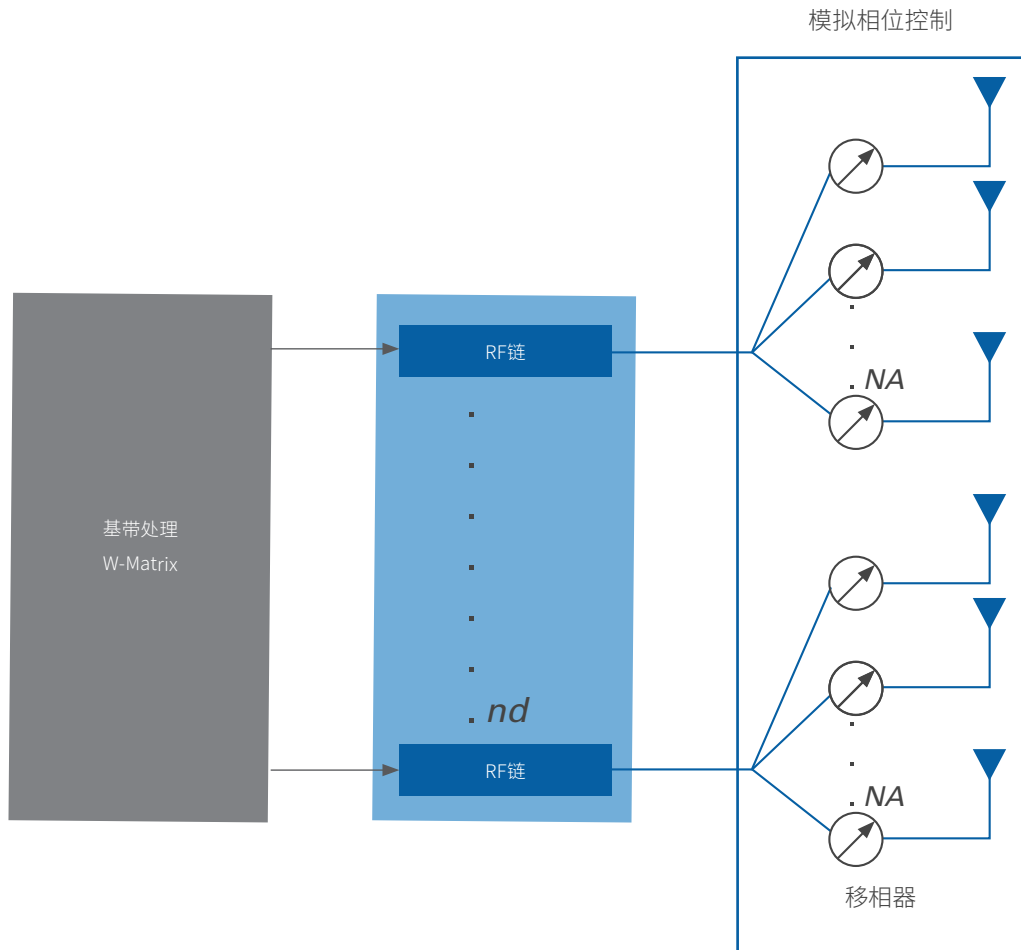


图21. 混合数字和模拟波束成形

最后, 我们刚才提到, 在毫米波频率下, 信道相干时间显著降低, 这给移动应用带来了严格的限制。研究人员需要继续研究在毫米波频率下改善UE移动性的新方法, 但很可能第一次5G毫米波部署将用于固定无线接入应用, 例如回程和侧链(Side Link)。

管理波束

使用毫米波波段的主要技术挑战之一是在超过20 GHz的频率, 信号传播损耗非常高。实际上, 这种损耗会减少可能的小区覆盖区域和范围。为了弥补这一缺陷, 标准制定者采用基于天线阵列的波束形成技术, 将RF能量聚焦到单个用户并提高信号增益。但是, UE不能再依靠毫米波gNB进行全向传输信号来建立初始连接。

NR标准针对UE采用了新的过程来建立与gNB的初始接入。在到达新小区覆盖区域时, UE无需识别波束的位置, 而是忽略gNB当前正在发送的波束方向, 便开始网络接入过程。

NR初始接入过程为UE建立与gNB的通信提供了一个有效的解决方案。它解决了盲目寻找gNB的问题, 不仅适用于毫米波运行, 而且适用于低于6 GHz的全向通信。这意味着初始接入过程必须应用于单波束和多波束场景, 此外还必须支持NR和LTE共存。

该过程遵循图22中所述的步骤。

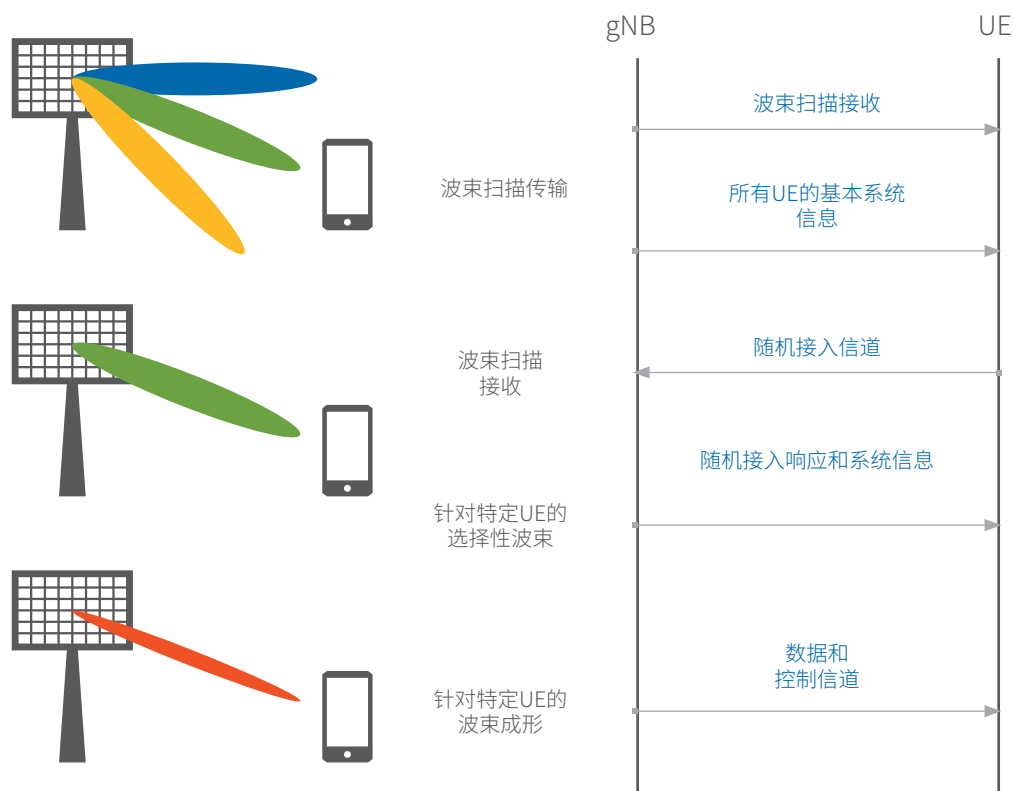


图22.初始接入过程

1. **波束扫描传输** - 如蓝色、绿色和黄色波束所示, gNB以多个方向按顺序在四个OFDM符号组(称为同步信号块(SS块))中传输物理广播信道(PBCH),并将每一个SS块映射到不同的空间方向。在波束扫描概念中, gNB会发送UE接入网络所需的同步信号和系统配置信息。
2. **波束扫描接收**--UE通过侦听来检测最佳SS块(检测到的最强波束),直至波束与发射机的波束方向相匹配。这允许UE解码最佳SS块并提取其时间索引。当UE知道gNB何时将再次使用该波束方向时, UE会在正确的时间在物理随机接入信道(PRACH)上向gNB发送波束, gNB就会知道UE将在何时以及在哪个方向发送UL信息。
3. **针对特定UE选定波束** - 当UE和gNB基于最佳波束建立通信后, gNB就会发送UE与gNB建立连接所需的其他系统信息。
4. **针对特定UE的波束成形** - 此时, 系统可以执行波束调节步骤, 使用较窄的波束将较宽的一般性波束覆盖范围缩小到针对特定UE的覆盖范围

Bandwidth Part

在未来的5G应用中, 由于不同频谱的可用性, 大量设备和仪器将在不同的频段中运行。举个例子, 比如一个RF带宽有限的UE需要与可以使用载波聚合来填充整个信道的强大设备以及可以使用单个RF链来覆盖整个信道的第三个设备一起工作⁷(图23)。

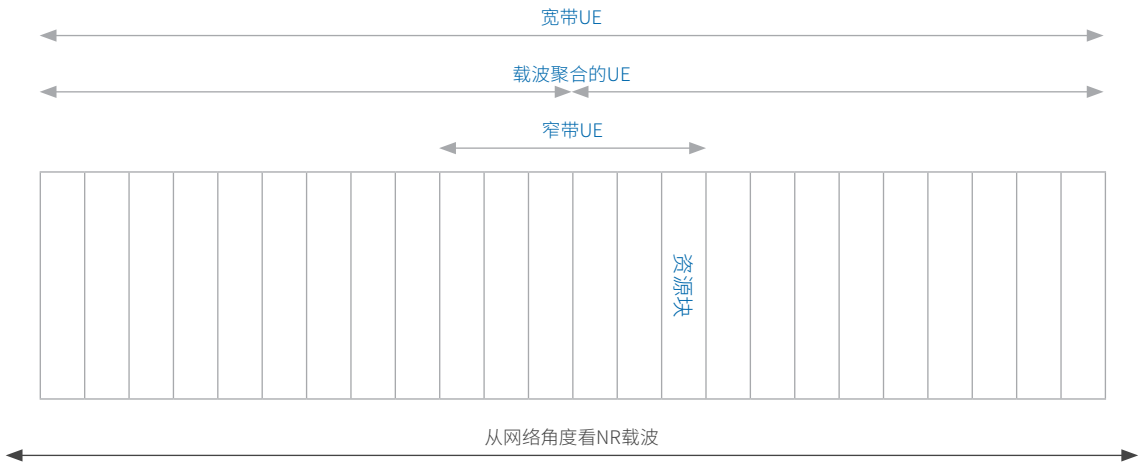


图23.更高效地管理频谱

尽管大带宽会直接提高用户可以体验到的数据速率,但这是需要付出代价的。当UE不需要高数据速率时,大带宽会导致RF和基带处理资源被低效利用,这无疑是一种浪费。

为了解决这个问题,3GPP提出了一个新概念——bandwidth part (BWP):网络使用一个宽带载波来配置某个UE,并使用载波聚合独立地为其他UE分配一组带内连续分量载波。这允许具有不同功能的各种设备共享相同的宽带载波。这种针对UE的不同RF性能进行调整的灵活网络操作是LTE无法实现的。

BWP由一组连续的PRB组成。每个BWP都有一个关联的SCS和CP (参数集, numerology)。因此,系统可以使用BWP以某种参数集(numerology)来重新配置UE。UE在初始接入期间以默认有效的BWP开始工作,直至系统在建立连接期间或建立连接之后对UE的BWP进行显式配置后,才开始使用配置的BWP。图25显示了网络正在向一个UE设备分配两个BWP (BWP 1和2),同时保留第三个全信道重叠BWP (BWP 3),以备另一更高带宽的UE设备或应用需要。

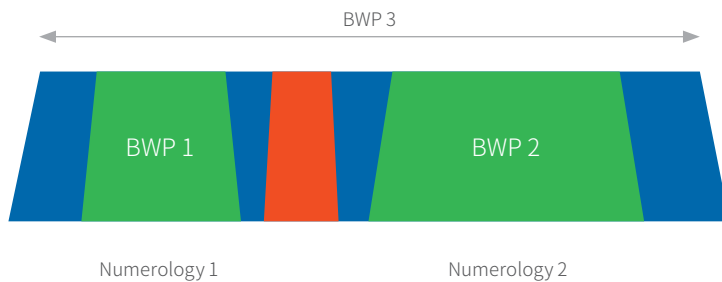


图24. Bandwidth Part

系统可以分别独立地为每个服务小区配置DL和UL BWP。Release 15规定,在任何时间点只能有一个DL中的BWP和一个UL中的BWP处于活动状态,但UE最多可以有四个BWP配置。总而言之,通过使用BWP,

NR可以灵活地为许多不同的业务提供服务,例如:当设备不需要全带宽操作时,可支持窄RF功能的UE,减少能耗支持多种参数集(numerology),并允许在非连续频谱中操作前向兼容性,可支持市场未来推出的设备和应用

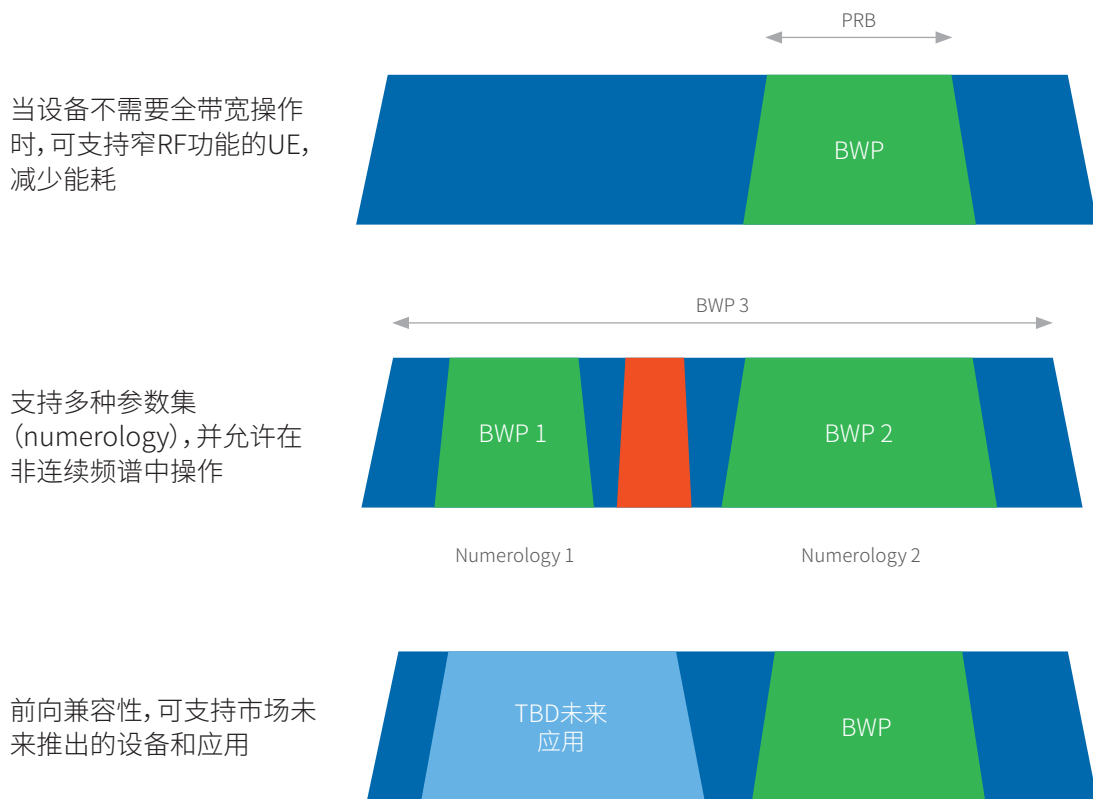


图25.BWP使得NR可服务于多种应用场景

结论: LTE和5G NR PHY比较

现在我们来比较5G NR与当前LTE的一些基本技术特征。

更高的频谱利用率

宽带5G载波预计将占据高达98%的信道,避免了载波之间出现宽保护频段。这有助于减少信道开销,并允许比LTE聚合载波更快的负载平衡。例如,图27对五个20 MHz LTE聚合载波与单个98 MHz 5G NR载波进行了比较。

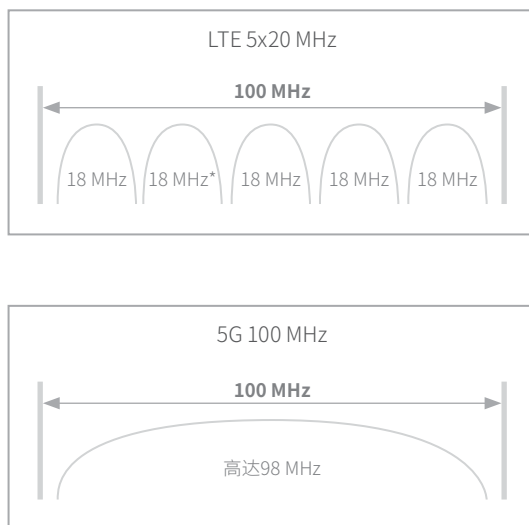


图26. 宽带5G载波具有更高的信道利用率

灵活参数集 (Numerology) 和框架结构

LTE在20 MHz信道中使用固定的15 kHz SCS和最多1200个子载波。相比之下，NR允许利用各种规模的信道、可变的SCS和时隙长度以及每个信道最多3300个子载波，频谱利用率更高。

利用精简的信令提高效率

LTE每毫秒发送四次特定小区参考信号，每5毫秒同步一次，每隔10毫秒发送一次；而5G没有针对特定小区的参考信号，并且每20毫秒同步和发送一次。这可以进一步降低基站的功耗。

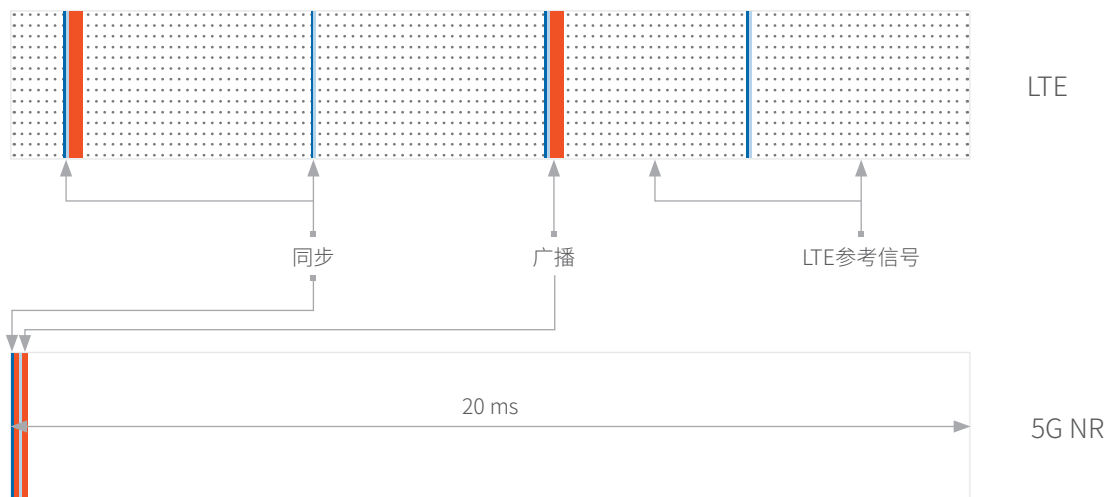


图27. LTE与5G NR之间的信令效率对比

动态管理TDD资源

LTE采用固定的静态TDD结构，将时隙分配给DL、UL或同步和控制信号。也就是说，在无线帧内，LTE TDD会在DL和UL传输之间切换多次，反之亦然。而5G可以在一个时隙内在DL和UL之间动态变化，满足任何方向的业务处理需求。



图28. NR可动态地管理TDD资源

通过增加信道带宽在毫米波频率下工作

目前得到许可的LTE网络仅限于在3800 MHz左右的最大频率下工作。5G NR网络不仅可以利用现有的蜂窝频段,而且也可利用大约30和40 GHz的新许可频谱。

更大带宽信道和多种参数集 (numerology) 选项将使NR系统能够在低于6 GHz的频带和毫米波波段中工作,并适当处理多径延迟扩展、信道相干时间和相位噪声。此外, NR将通过更高的数据速率支持现有业务和新业务,并使用可变SCS来改变传输周转时间,以及通过分配28 GHz附近及以上的宽信道来满足不同的延迟和移动性要求。NR将利用最新大规模MIMO和波束成形技术的进步,以最大限度地提高频谱效率并保证为更多用户提供更好的服务。

此外,考虑到商业应用中需要部署具有不同RF功能的不同UE, NR中的新BWP概念有助于提高UE的工作能效以及更好地管理频谱。

总之,5G无线技术有望为全球更多的人群提供大量可靠、数据丰富且高度连接的应用。虽然部署可支持这一目标的基础设施以及开发下一代5G设备会面临着各种严峻的设计和测试挑战,但NI基于平台的无线技术设计、原型验证和测试方法将成为未来十年实现5G的关键。

词汇表

3GPP	Third Generation Partnership Project 第三代合作伙伴计划
AR	augmented reality 增强现实
BCH	broadcast channel 广播信道
BPSK	binary phase-shift keying 二进制相移键控
BS	base station 基站
BWP	bandwidth parts bandwidth part
CP	cyclic prefix 循环前缀
CP-OFDM	cyclic prefix orthogonal frequency division multiplexing 循环前缀正交频分复用

CSI-RS	Channel State Information Reference Signal 信道状态信息参考信号
DFT	discrete Fourier transform 离散傅里叶变换
DFT-SOFDM	discrete Fourier transform spread orthogonal frequency division multiplexing 离散傅立叶变换扩频正交频分复用
DL	downlink 下行链路
DMRS	demodulation reference signal 解调参考信号
eMBB	Enhanced Mobile Broadband 增强型移动宽带
EPC	Evolved Packet Core 演进分组核心
EVM	error vector magnitude 误差矢量幅度
FDD	frequency division duplex 频分双工
FDMA	frequency division multiple access 频分多址
FFT	fast Fourier transform 快速傅立叶变换
GP	guard period 保护期
gNB	g node b, a 5G base station 5G基站
mMTC	Massive Machine-Type Communication 大量节点机器型通信
mmWave	millimeter wave 毫米波
MIMO	multiple input, multiple output 多输入, 多输出
MU-MIMO	Multiuser MIMO 多用户MIMO
NR	New Radio 新空口
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing 正交频分复用

PA	power amplifier 功率放大器
PAPR	peak-to-average power ratio 峰值与平均功率比
PBCH	physical broadcast channel 物理广播信道
PRACH	Physical Random Access Channel 物理随机接入信道
PRB	physical resource block 物理资源块
PTRS	phase-tracking reference signal 相位跟踪参考信号
QAM	quadrature amplitude modulation 正交幅度调制
QPSK	quadrature (quaternary) phase-shift keying 正交(四元)相移键控
RAN	radio access network 无线接入网络
SCS	subcarrier spacing 子载波间隔
SRS	Sounding Reference Signal 探测参考信号
TDD	time division duplex(ing) 时分双工
TDM	time division multiplexing 时分复用
UE	user equipment 用户设备
UL	uplink (reverse link) 上行链路(反向链路)
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication 高可靠低延迟通信
VR	virtual reality 虚拟现实

尾注

- ¹ 3GPP TS 38.101-1 V15.0.0 (2017-12) Technical Specification Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception.
- ² 3GPP TS 38.211 V15.0.0 (2017-12) Technical Specification Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation.
- ³ 3GPP TR 38.912 V14.1.0 Technical Specification Group Radio Access Network; Study on New Radio (NR) access technology (Release 14.)
- ⁴ 3GPP TS 38.214 V15.0.0 (2017-12) Technical Specification Radio Access Network; NR; Physical layer procedures for data.
- ⁵ Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, “An introduction to the multi-user MIMO downlink,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 60–67, Oct. 2004.
- ⁶ S. Han, C. I. I, Z. Xu, and C. Rowell, “Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 186–194, January 2015.
- ⁷ 3GPP TS 38.213 V15.0.0 (2017-12) Technical Specification Radio Access Network; NR; Physical layer procedures for control.

