

ZTE中兴



中兴通讯  
5G 上行增强技术白皮书



<b>概述</b>	<b>01</b>
<b>5G 时代对上行性能提出高要求</b>	<b>02</b>
5G 上行需要满足大带宽、低时延的高要求	02
主流 5G 商用频段较高并采用 TDD 制式	02
5G NR 商用部署面临挑战	04
<b>5G 时代的主要上行增强技术</b>	<b>05</b>
3GPP Rel-15 包括多种上行增强技术	05
5G 双连接 (EN-DC) 技术	06
5G 载波聚合 (CA) 技术	07
5G 补充上行链路 (SUL) 技术	09
3GPP Rel-16 引入 UL Tx Switching 技术进一步增强上行	11
Uplink Tx Switching, 匹配终端能力最大化资源利用率	11
Uplink Tx Switching (EN-DC)	12
Uplink Tx Switching (UL Inter-band CA)	12
Uplink Tx Switching (SUL)	13
<b>上行增强技术对比与分析</b>	<b>15</b>
总体架构对比	15
系统性能对比	16
小结	16
<b>上行增强技术的演进和发展</b>	<b>17</b>
载波聚合能力的增强, 使得载波聚合的潜力进一步被释放	17
NN-DC 双连接	18
TDD 异帧 CA	18
<b>总结与展望</b>	<b>19</b>
<b>缩略语</b>	<b>20</b>

# 概述

5G 具有更大的传输容量、更高的可靠性、更低的时延，不但可以满足 ToC 持续增长的大带宽移动互联网需求，还能够与垂直行业的多种业务融合，满足工业制造、交通、能源、医疗等 ToB 行业应用需求，因此 5G 作为新一代数字化基础设施，正在成为经济社会发展的新动能。

同时随着移动互联网、物联网、云存储、智能监控等业务的多元化发展，海量数据的上传要求也快速增长，包括超高清视频通信、大数据采集、智能监控、AR/VR 视频直播等都对 5G 的性能，特别是上行容量、上行覆盖等提出了高要求。

目前主流的 5G 商用部署频段主要为 3.5GHz/2.6GHz 等 TDD-NR 频段，这些频段的主要特点是带宽大、容量高，但由于穿透损耗相对较高、上行占空比较低等原因其上行覆盖、容量等方面都存在不足。因此为了保障多元化业务的发展、提升用户体验和降低部署成本，亟需提升 5G 网络的上行性能。

业界已经提出了多种 5G 上行增强技术。本白皮书按照标准的发展和演进，详细阐述了双连接、载波聚合和补充上行链路等技术的原理，进行了详细的对比分析，并展望了上行增强技术演进和发展。





# 5G 时代对上行性能提出高要求

无线通信在过去 30 年经历了突飞猛进的发展，从以语音为主的 2G 时代，发展到以数据为主的 3G/4G 时代，目前正在步入万物互联的 5G 时代。5G，作为新一代的移动通信技术，已经成为赋能各行各业的通用技术，呈现出不同于以往的新特点。

## 5G 上行需要满足大带宽、低时延的高要求

5G 技术可以提供 10 倍于 4G 的峰值速率及用户体验速率、百万的连接数以及超低的空口时延。在 5G 商用初期主要聚焦于 eMBB 业务，满足大带宽移动互联网应用需求，如超高清视频、沉浸式游戏、全息视频、下一代社交网络等业务。其中，视频类业务图像分辨率发展到 4K、8K 等超高清技术，观看方式由单一平面视角向 VR 和自由视角发展，对通信网络带宽提出更高的要求；交互类业务的发展对通信网络的时延带来了更大的挑战。例如超高清视频类业务，从标清视频要求的几兆比特每秒的数据速率逐步提高到上百兆级别，时延要求降低到 20ms、甚至 10ms 以下。

随着用户体验要求的提高、清晰度的提升、内容的丰富化、用户群体的扩大等呈逐步提升，带宽和时延等网络能力的

需求还在不断提升。同时 5G 商用进程的全面开启和网络建设的加速推进，进一步推动 5G 从 ToC 领域持续向 ToB 延伸。5G 与垂直行业的进一步融合应用，从更宽范围的业务需求、更丰富的功能、更可靠的性能等方面又对 5G 通信网络提出更高、更严格的要求。

无论是 ToC 还是 ToB 业务，都要满足上行数据发送需求，例如高清视频通信、网络游戏、大数据采集、智能监控、AR/VR 视频直播等海量数据的上传，而且这些业务的带宽、时延等要求随着移动互联网、物联网、云存储、智能监控等业务的多元化发展而不断提升。所以建设高质量的 5G 商用网络，持续满足上行方向的大容量、低时延特性是商用部署的重点关注点之一。

## 主流 5G 商用频段较高并采用 TDD 制式

频谱是移动通信领域的核心资源。根据 3GPP 的划分，5G NR 主要包括了两大频谱范围：FR1 (410MHz-7125MHz)，即 Sub-6GHz，和 FR2(24250MHz-52600MHz)，即毫米波。

按照已经商用的 5G 商用网络部署情况来看，主流 Sub-6G 频段包括 3.5GHz、2.6GHz 等。这些频段在 3GPP 的定义如下：

NR 工作频段	上行工作频段	下行工作频段	双工模式
n41	2496-2690 MHz	2496-2690 MHz	TDD
n78	3300-3800 MHz	3300-3800 MHz	TDD

图 主流 5G 商用频段



## 5G 的主流商用频段有以下特点：

### ① 频段相对较高

目前低于 3GHz 的大部分频段都已经分配给 2G/3G/4G 移动通信网络或者其他系统使用，因此 5G 商用网络主要采用中高频段。

#### 频段高，路径损耗较高

5G 采用更高的频谱以获取更多带宽资源，然而无线信号的传播特性是频率越高在空间传播的空间损耗越大，这将影响其覆盖能力。根据传播模型测算，相同距离下：3.5GHz 比 1.8GHz 路径损耗高 5.8dB 左右；3.5GHz 比 2.1GHz 路径损耗高 4.4dB 左右。

#### 频段高，穿透损耗较高（室外覆盖室内场景）

当无线信号要穿透建筑物提供无线覆盖时，穿透损耗和建筑物材质、频段直接相关。主流通信频段对建筑物材质的穿透损耗测试数据如下表所示：

类别	1800/2100MHz	2600MHz	3500MHz
砖墙穿透损耗 (dB)	10-15	11-18	12-20
混凝土墙穿透损耗 (dB)	20-30	22-32	25-35
石膏板墙穿透损耗 (dB)	8-12	9-14	10-15
玻璃墙穿透损耗 (dB)	2-5	4-6	5-8
薄木门穿透损耗 (dB)	3-5	5-7	5-8

图 不同频段下建筑物材质穿透损耗测试数据

虽然 5G 网络中引入了 Massive MIMO 等先进技术，可以部分缩小与中低频段在传播损耗上的差异，中高频段的覆盖能力仍弱于传统低频段。

### ② 采用时分双工，上行占空比低

5G 的主流商用频段（例如 3.5GHz、2.6GHz 等）在 3GPP 中定义为时分双工模式（TDD），即基站与终端之间的数据收发采用相同的频点来进行通信，但是通过时间来区分上下行的收发。在 3GPP 中通过帧结构中上下行时隙来定义上下行数据的发送时间，目前三种主流的帧结构如下：

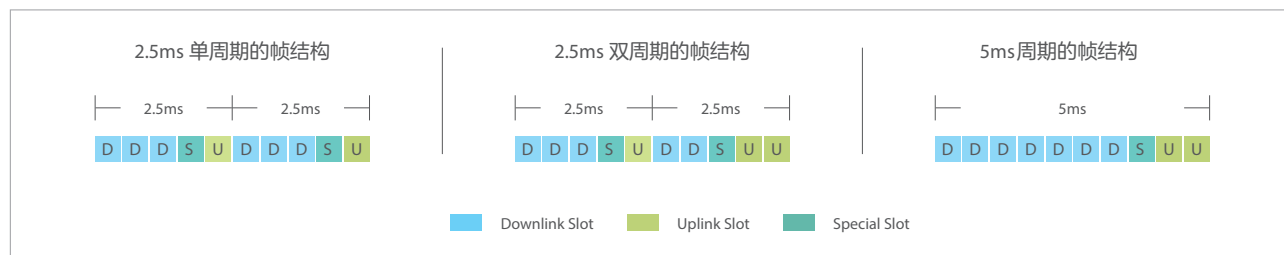


图 5G 主流帧结构

可以看出，不同的帧结构中上行时隙的占比是不同的。例如针对 2.5ms 双周期的帧结构，其特点是每 5ms 里面包含 5 个全下行时隙、3 个全上行时隙和两个特殊时隙。简单折算的上下行占比配置为 3: 7，即 30% 时隙用于上行、70% 时隙用于下行。

## 5G NR 商用部署面临挑战

由于频段的传播特性以及双工制式的差异，采用中高频段（例如 3.5GHz、2.6GHz 频段等）来部署 5G 商用网络会存在一定的挑战。

### TDD 上行覆盖受限，限制 TDD 下行大带宽优势

5G TDD-NR 基站一般都采用大规模天线阵列，天线数目的增多为传播信道提供了更多的复用增益和分集增益，使得系统在下行方向的数据速率、链路可靠性和覆盖上拥有更好的性能。

但是在上行方向，即从终端向基站发送数据的通路上，终端的发射功率限制使 5G 上行的覆盖。此外，终端体积限制了天线数量，无法利用 Massive MIMO，再加上 TDD 上下行时隙配比的差异等，进一步扩大了上下行覆盖的差距。

TDD-NR 的上行覆盖受限，使得用户在超出上行覆盖区域之后就无法使用 5G 下行的高速数据业务，限制了 5G 下行大带宽的优势。

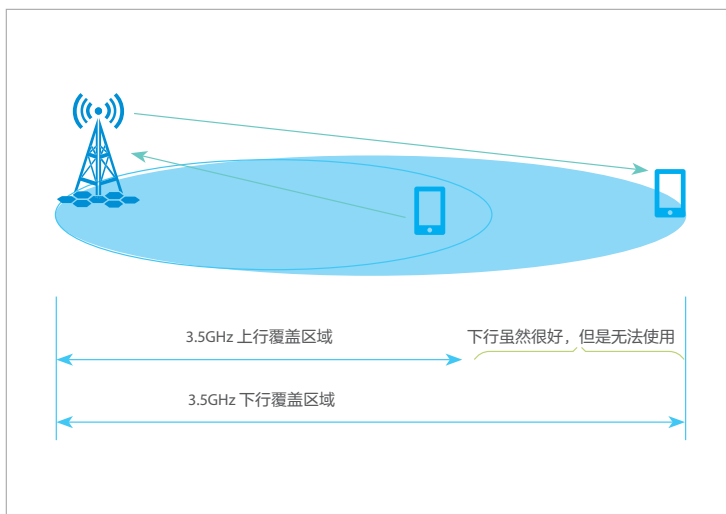


图 5G NR 的上行和下行对比

### 4G 和 5G 共站点部署时，上行覆盖受限会导致 5G 无法连续覆盖

在 5G NR 部署的初始阶段一般都会采用 4G 和 5G 共站点的部署策略。但是由于中高频段的上行覆盖劣势，会使得 5G 的覆盖弱于 4G（一般采用中低频段，例如 1.8GHz/2.1GHz），因此会出现 5G 覆盖不连续的情况。这使得用户无法连续使用 5G 的高速数据业务，当用户移动出 5G 覆盖区域后，由于数据业务回落到 4G 上出现数据速率下降而使得用户体验变差。



图 5G NR 和 FDD-LTE 的覆盖对比分析

### TDD 上行容量小，无法满足高速数据业务上行需求

由于 TDD 的上行占空比低，使得实际的上行容量较小。例如采用 2.5ms 双周期帧结构的情况下，简单折算的上下行占比配置为 3: 7，即 30% 时隙用于上行、70% 时隙用于下行。以 100MHz 带宽为例，上行方向实际可用折算下来也只有 30MHz 带宽，仅为 4G 单载波的 1.5 倍，使得吞吐量提升比例弱于下行方向的提升比例，难以持续满足上行流量需求较大的业务发展要求。

# 5G 时代的主要上行增强技术

为了满足 ToC 和 ToB 的持续发展要求，需要不断提升 5G 网络的上行性能。因此上行增强技术是 5G 商用网络的重点关注方向之一。

3GPP（第三代合作伙伴计划）在 5G NR 的标准中也持续关注上行增强技术。截至 2020 年 7 月，已经发布的 5G 规范包括：

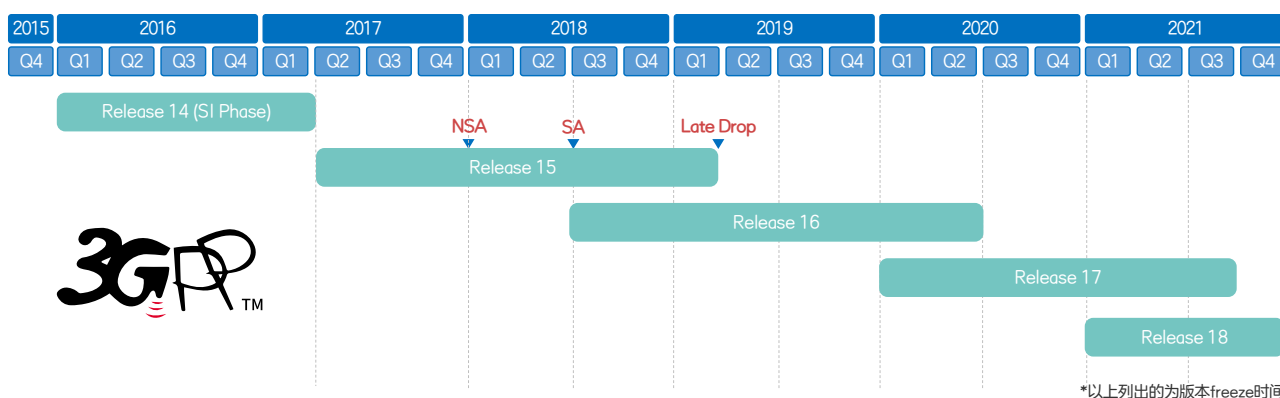


图 3GPP 5G Release 冻结时间计划

## Release 15（简称为 Rel-15）

3GPP 在 2017 年 12 月正式宣布 5G 新空口（NR）技术非独立组网（NSA）功能冻结；2018 年 6 月，完成了独立组网（SA）标准的制定，意味着 3GPP 首个完整的 5G 标准 Rel-15 正式落地，5G 产业链进入商用；2019 年 3 月完成 Late Drop 版本冻结。

## Release 16（简称为 Rel-16）

Rel-16 属于 5G 增强版本，主要研究内容包括 eMBB 功能增强、毫米波增强、uRLLC 增强功能等。2020 年 7 月，3GPP 宣布 5G 标准第二版规范 Release 16 冻结，这也标志着 5G 第一个演进版本完成。

Rel-15 和 Rel-16 版本中对多种上行增强技术都进行了定义和增强，例如提升终端的发射功率、引入 long-PUCCH 等技术。本白皮书重点关注如何利用多个频段的协同组网来增强上行，并按照标准的演进来进行阐述和分析。

## 3GPP Rel-15 包括多种上行增强技术

3GPP Rel-15 涉及如下三种上行增强技术：双连接（EN-DC, E-UTRA-NR Dual Connectivity）、载波聚合（CA, Carrier Aggregation）、和上行补充载波（SUL, Supplementary Uplink）。

注：在本白皮书中，为了使得分析和对比都基于相同的基础，如果不特别说明，都主要是采用 2.1GHz（带宽 20MHz）和 3.5GHz（带宽 100MHz），并采用 2.5ms 双周期的帧结构进行分析和说明。

注：尽管本白皮书列举了 FDD 和 TDD 载波的协同技术，但是上行增强提升技术不仅仅局限于这两类载波。每个技术涉及的双工制式和频段，都请参考 3GPP 的定义。



## 5G 双连接（EN-DC）技术

### 1 技术原理

在 5G 部署初期，考虑到 5G 核心网的成本及成熟度、并快速开展业务，部分运营商选择非独立组网（NSA）模式，并选择 5G 基站优先接入 4G 核心网（EPC），因此选项 3 系列（Option 3/3A/3X）作为 5G 初期首选。

在 Option 3 系列架构中以 4G 为主节点，5G 为辅节点的双连接，也称为 EN-DC（E-UTRA-NR Dual Connectivity）。在这样的双连接架构中，手机有两条路径——4G 或者 5G 基站到达核心网，因此能很好地解决小区边缘用户的覆盖问题。

### 2 应用场景

由于 4G 和 5G 的覆盖有所差异，EN-DC 的应用场景如下图所示：

在区域 A：同时存在 4G 和 5G 的覆盖。采用 EN-DC 架构后，上行方向可以采用双连接、即数据可以从 4G 和 5G 发送。由于商用终端普遍支持 2 个发射通道，所以会采用一个 Tx 支持 LTE、另一个 Tx 支持 5G NR 的方式来发送数据。

在区域 B：对于上行方向，由于只有 4G 的覆盖，那么此时数据只能从 4G 发送。

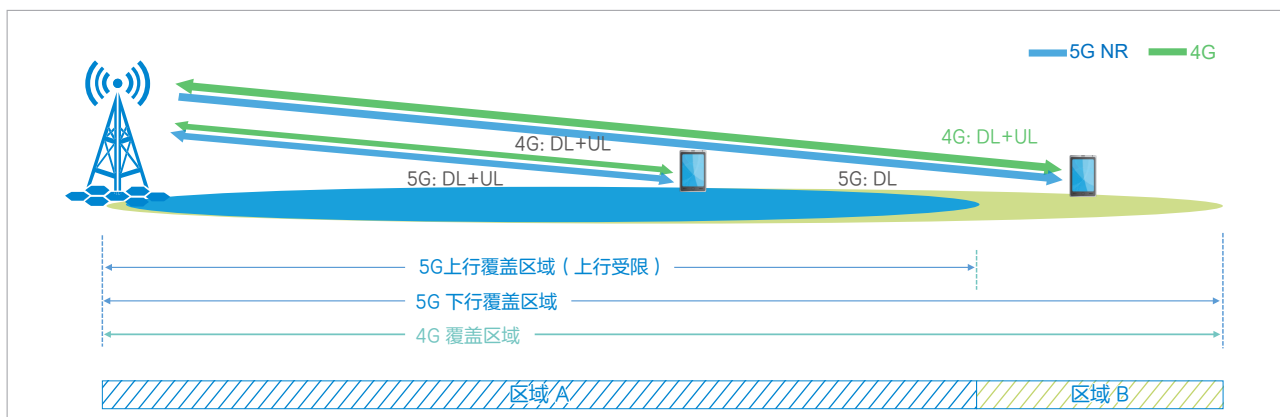


图 EN-DC 场景示例

在区域 A 和区域 B，终端的上行工作模式如下图所示：

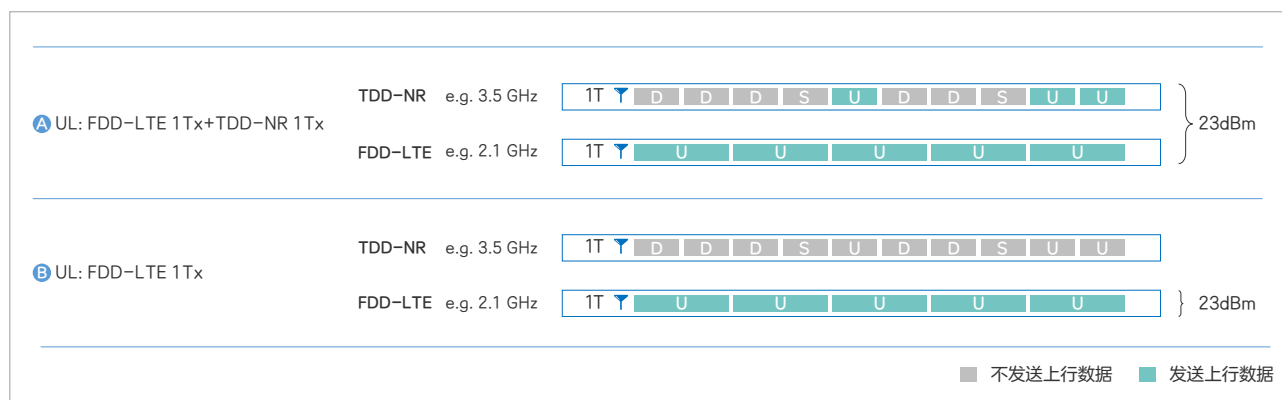


图 EN-DC 架构下终端上行工作模式

无论在区域 A 还是区域 B，因为始终保持了用户的数据连接、不会产生掉话，保证了用户体验。

### ③ 性能分析

#### 单用户峰值

由于采用了双连接的方式，终端可以使用 4G 和 5G 的通道发射数据。但是由于终端的一个 Tx 支持 LTE，另一个 Tx 支持 5G NR，5G NR 的上行双流能力被限制，上行吞吐量只有 5G SA 单用户上行吞吐量的 74% 左右。

#### 覆盖

在没有 5G 覆盖的区域，上行使用 LTE 来发送数据，所以尽管 5G 的上行覆盖实质上并没有提升，但是对于用户来说覆盖范围得到了延伸，数据连接保持不掉话。例如，在密集城区、上行链路的边缘速率为 2Mbps 的情况下，如果基于 EN-DC 架构并采用 FDD-LTE 2.1GHz（带宽 20MHz）和 TDD-NR 3.5GHz（带宽 100MHz）组网，其覆盖相比基于 SA 架构采用 TDD-NR 单载波的情况下提升 17.8%。

总体来看，5G 部署采用 NSA 架构的情况下，其上行吞吐量相比 4G 网络有了一定程度的提升，但相比 5G SA 架构的吞吐量是降低的。本质上 5G NR 的覆盖没有提升，但是对超出 5G 上行覆盖区的用户来说，由于信令和数据都可以利用 4G 来传输，所以用户体验相比 4G 没有明显下降。

## 5G 载波聚合 (CA) 技术

### ① 技术原理

由于每个运营商获取到的频段有限，且不一定连续，如果每个终端都只能用其中一部分频段的话，那么资源将不能被充分使用。CA（Carrier Aggregation，载波聚合）技术就是针对这类情况，把相同频段或者不同频段的频谱资源聚合起来给终端使用，从而提升整网资源利用率，改善用户体验。

CA 在 3GPP 发布的 4G 标准 Release 10 阶段就已经引入，并在全球成熟商用。5G 时代载波聚合的需求和作用将会更明显。

### ② CA 技术按照聚合载波所在的频段，可以进一步区分为带内载波聚合和带外载波聚合。

#### 带内载波聚合 (Intra-Band CA)

带内载波聚合是聚合同一频段内的多个载波，在标准中定义了多种频段的带内载波聚合，包括 n77、n78、n79 等。

在上行方向，尽管通过带内载波聚合后并不会提升覆盖，但是由于两个载波可以共用相同的发射通道，所以针对单用户来说吞吐量有所提升。

例如 3.5GHz 频段内两个相同带宽的载波聚合后，单个用户的数据速率约 100% 提升。

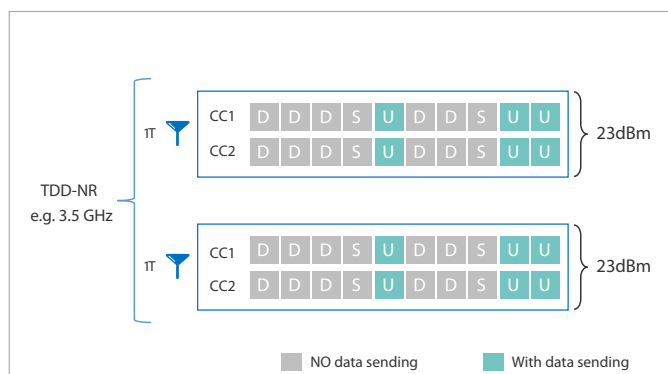


图 5G Rel-15 UL CA (Intra-Band) 的终端上行工作模式

## 带外载波聚合 (Inter-Band CA)

带外载波聚合是聚合不同频段的载波。在 3GPP Rel-15 中定义的 FR1 带外载波聚合包括 13 种频段组合<sup>[1]</sup>，例如 CA\_n3-n78、CA\_n28-n78 等。

针对同时存在多个 NR 载波并且覆盖都比较好的区域，可以采用 UL CA 提升频谱利用率，但是由于受到终端普遍支持 2Tx 的限制，需要两个 Tx 分别支持两个频段，因此采用 UL CA 会使得在 TDD-NR 上的上行双流能力被限制，容量可能会有损失。

### 应用场景

在区域 A：在两个载波的都覆盖的区域可以利用 UL CA 进行频段聚合；

在区域 B：由于只有单载波的覆盖，所以上行链路仅使用 NR Carrier2 进行通信。

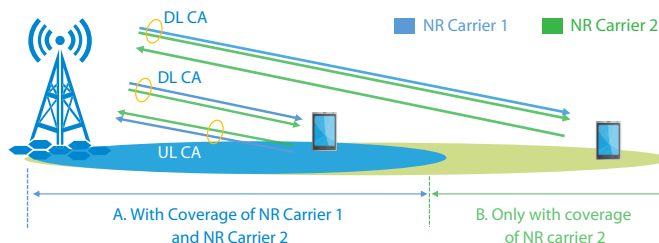


图 UL CA (Inter-Band) 的应用场景

在区域 A 和 B，终端的上行链路的工作模式：

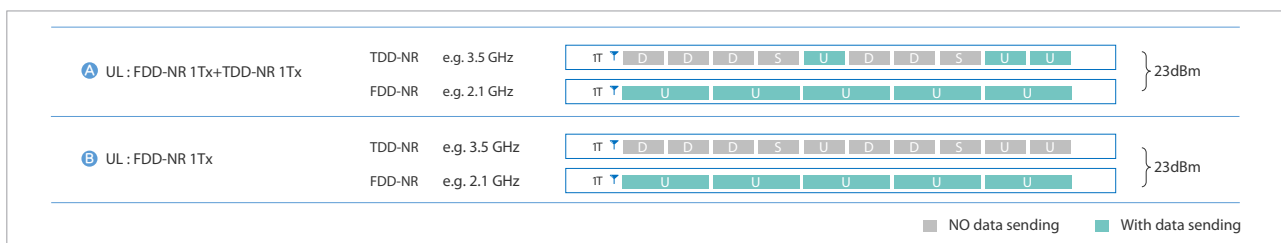


图 5G Rel-15 UL CA (Inter-Band) 的终端上行工作模式

### 性能分析

#### 吞吐量

由于 UL CA 不能使用上行双流，所以可能会对容量会产生负面影响，例如采用 2.1GHz (20MHz 带宽) 和 3.5GHz (100MHz 带宽) 进行载波聚合时，单用户的上行峰值下降到 SA 模式单载波峰值的 80%。在这种情况下系统侧将采用单载波的资源分配方式以保持单用户的峰值不下降。

但是，UL CA 并非在所有情况下都会对容量产生负面影响。载波聚合后的容量和聚合的两个载波 (CC1 和 CC2) 的带宽、上行占空比等都相关，当 CC2 的吞吐量不低于 CC1 单流的吞吐量时，UL CA 会提升上行容量。例如，CC1 是 TDD-NR 载波 (带宽 50MHz)，CC2 是 FDD-NR 载波 (带宽 20MHz)，在采用 2.5ms 双周期的帧结构情况下，采用 UL CA 的上行峰值相比于 TDD-NR 单载波双流的上行峰值提升了约 8%。

#### 覆盖

FDD-NR 一般都采用中低频段，上行覆盖好于 TDD-NR。所以超出 TDD-NR 覆盖区域时，主要是利用 FDD-NR 来提供覆盖，对于单用户来说用户体验有提升。例如，在密集城区、上行链路的边缘速率为 2Mbps 的情况下，如果采用 FDD-NR 2.1GHz (带宽 20MHz) 和 TDD-NR 3.5GHz (带宽 100MHz) 组网，其覆盖相比基于 SA 架构采用 TDD-NR 单载波的情况提升 17.8%。

载波聚合技术从 4G 时代引入，并已经在全球多个 LTE 网络中成功部署和商用。3GPP Rel-15 中已经包括载波聚合的内容。频段内的载波聚合技术可以达到聚合多个频段并改善用户峰值速率体验的目标，但是频段间的载波聚合技术却受限于终端的发射通道限制，在某些场景下对吞吐量有负面影响。



## 5G 补充上行链路 (SUL) 技术

### 1 技术原理

在 3GPP Rel-15 中新增了一个上行增强技术——补充上行链路 (SUL, Supplementary Uplink) 技术, 通过提供一个补充的上行链路 (一般处于低频段) 来保证上行覆盖。

对于采用 SUL 的通信系统, 在同一个小区内会配置一个 DL 频段 (NR 频段) 和 2 个上行频段 (NR 频段 +SUL 频段)。

在 NR 载波的上行覆盖比较好的情况下, 终端会采用 NR 载波进行数据发送和接收。当超出 NR 载波的覆盖范围后, 终端会采用 SUL 载波进行数据的发送。终端可以在 UL NR 和 SUL 之间动态选择发送链路, 但是在同一个时刻终端只能选择其中的一条发送, 不能同时使用两条上行链路。

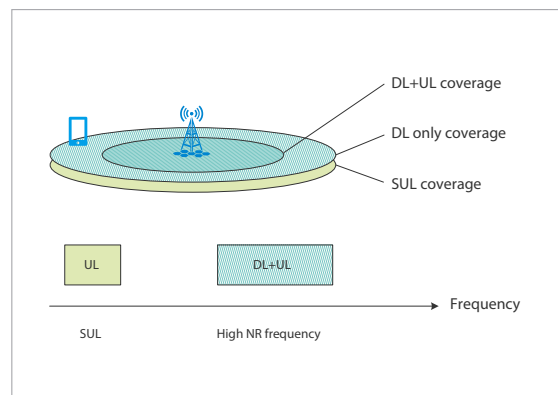


图 SUL 示意图

3GPP 定义的 SUL 频段:

SUL 定义			
SUL 频段	上行工作频段	下行工作频段	双工模式
n80	1710 MHz – 1785 MHz	N/A	SUL
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz – 1980 MHz	N/A	SUL
n86	1710 MHz – 1780 MHz	N/A	SUL

对应的 NR/LTE 定义	
NR/LTE 频段	上行工作频段
n3/b3	1710 MHz – 1785 MHz
n8/b8	880 MHz – 915 MHz
n20/b20	832 MHz – 862 MHz
n28/b28	703 MHz – 748 MHz
n1/b1	1920 MHz – 1980 MHz
n66	1710 MHz – 1780 MHz

表 SUL 频段定义

SUL 频段和普通的 FDD-LTE/FDD-NR 频段的上行定义完全相同, 需要和现网 (4G 或者 5G) 的频段共享使用。

SUL 频段只有上行, 所以不能单独使用。因此在 3GPP Rel-15 中针对 NR 和 SUL 的组合频段也进行了定义, 包括 n78、n79 频段和 SUL 频段的组合定义, 共计 8 种<sup>[1]</sup>。

### 2 应用场景

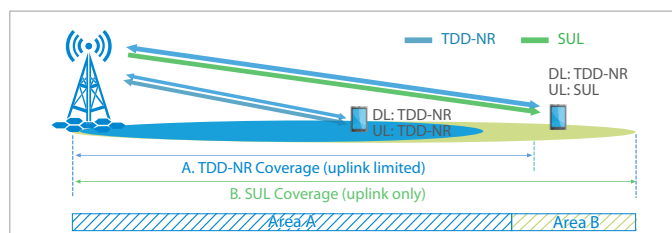


图 SUL 的应用场景

SUL 的应用场景如下图所示:

区域 A: TDD-NR (例如 3.5GHz) 的覆盖良好时, 终端的上行使用 TDD-NR 来进行数据收发;

区域 B: 当终端远离基站时, 上行就会切换到 SUL 频段上进行数据发送。

不同的终端，在区域 A 和区域 B 中所使用的工作模式如下：

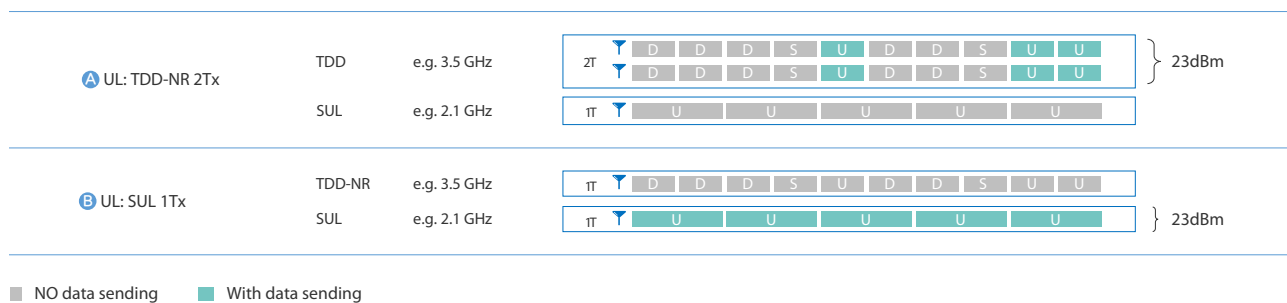


图 SUL 的终端上行工作模式

### 3 性能分析

#### 容量分析

从终端的工作模式图示可以看到，在 TDD-NR 覆盖好的区域，用户会采用 TDD-NR 来收发数据，所以 SUL 对单用户的峰值没有影响。

#### 覆盖分析

SUL 一般都采用中低频段，上行覆盖好于 TDD-NR。所以 SUL 主要是利用低频段补充了 TDD-NR 覆盖，对于单用户来说用户体验有提升。例如，在密集城区、上行链路的边缘速率为 2Mbps 的情况下，如果采用 SUL 2.1GHz（带宽 20MHz）和 TDD-NR 3.5GHz（带宽 100MHz）组网，其覆盖相比基于 SA 架构采用 TDD-NR 单载波的情况下提升 17.8%。

虽然 SUL 从上述的性能提升来看，既能保证在 5G 覆盖区域使用 TDD 的双流能力，又能在小区远点使用 SUL 频段来补充上行覆盖。但是作为新引入的技术，上行补充增强技术实际加强了普通 5G NR 频段和 SUL 频段之间的紧耦合，在实际的部署上存在明显的限制，包括：

TDD-NR DL/UL 和 SUL 必须属于一个小区，这是 SUL 与 CA 的区别之处，也就是说 SUL 无法做到跨小区、跨基站之间的上行补充覆盖。

即便是同站的 TDD-NR 频段和 SUL 频段，也要求两个不同载波同覆盖且具备相同的工参，这在商用组网环境下难以实现。

SUL 技术通过新引入 SUL 频段来解决中高频段的上行覆盖受限问题，但对容量没有提升。同时，SUL 必须和 5G NR 组合成一个逻辑小区，因此要求 4G 和 5G 站点紧耦合，限制了 5G 部署的自由度，给实际的商用部署带来了新问题。



## 3GPP Rel-16 引入 UL Tx Switching 技术进一步增强上行

3GPP Release 16 中针对 EN-DC、CA 和 SUL 三个技术都进行了增强。

### Uplink Tx Switching, 匹配终端能力最大化资源利用率

考虑到天线设计复杂性、发射功率限制等因素，5G 商用终端上行普遍为 2 个发射通道（2Tx），理想情况下采用上行双流方式传输，等效带宽翻倍。但由于通道数量的限制，使得在多频段组网时频谱资源没有得到最佳利用：

- 如果采用 EN-DC 架构，那么 NR 上的发射通道只有 1 个，无法使用上行双流传输，频谱资源没有得到有效利用；
- 如果采用带内载波聚合技术，吞吐量可以实现线性叠加。但如果需要进行带外载波聚合，则其中每个载波都只能使用 1 个发射通道，TDD-NR 载波的上行无法使用双流传输，聚合后的上行容量可能反而不如不激活载波聚合。
- 采用 SUL 后虽然可以保持 TDD-NR 载波的上行双流能力，但是 SUL 频段在小区近点没有得到有效利用。

因此在 3GPP Rel-16 标准中引入上行发射通道切换的机制（Uplink Tx Switching），即一个发射通道在载波 1 和载波 2 之间切换，另一个发射通道固定给载波 2 使用：

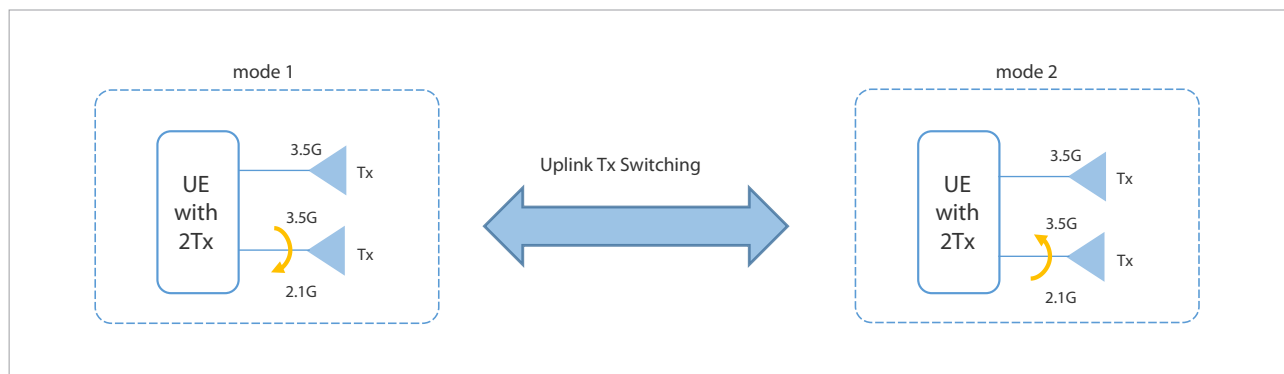
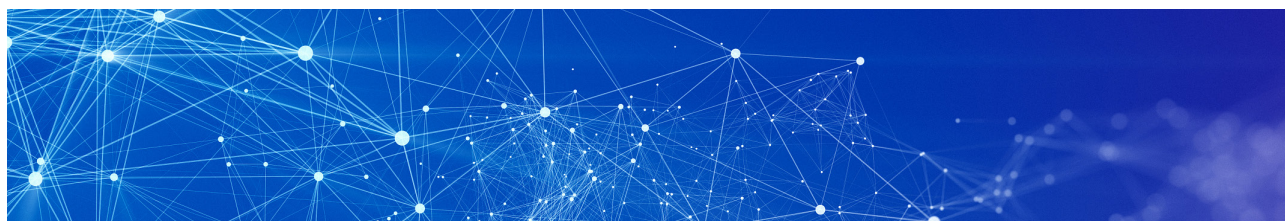


图 Uplink Tx Switching 模式

Case 1: 终端的一个发射通道给 2.1GHz 使用，另一个发射通道固定给 3.5GHz 使用；

Case 2: 终端的一个发射通道切换到 3.5GHz，由于另一个发射通道还是 3.5GHz，此时就可以支持 TDD-NR 双流传输，实现频谱最大化利用。





在 Case 1 和 Case 2 转换时，须采用 Uplink Tx Switching 技术。考虑到终端的实际支持能力不同，标准中还进一步定义了 Option1 和 Option2:

Option 1: 终端可以在 Carrier1 和 Carrier2 上时分发送数据，但是不能同时发送。

Option 2: 终端可以在 Carrier1 和 Carrier2 上灵活聚合，既可以时分发送，也可以同时发送。

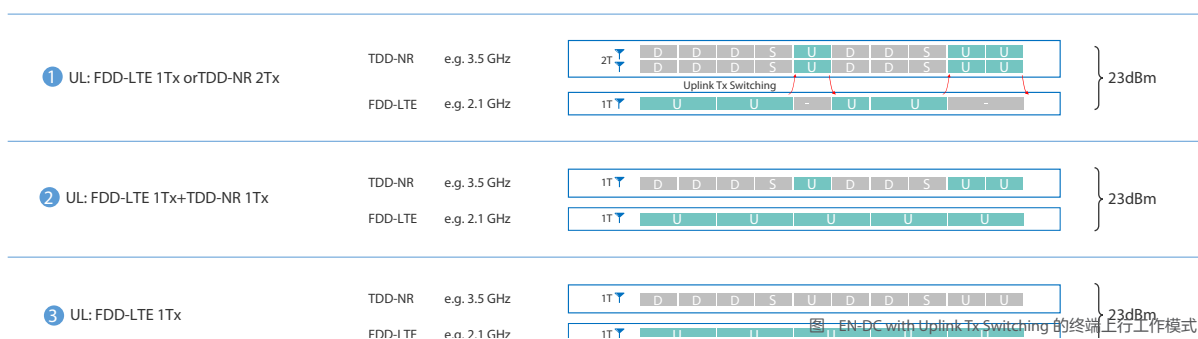
	天线发送模式	上传传输的天线端口数
Case 1	1T+1T	1P+0P
Case 2	0T+2T	0P+2P, 0P+1P

	天线发送模式	上传传输的天线端口数
Case 1	1T+1T	1P+0P, 1P+1P, 0P+1P
Case 2	0T+2T	0P+2P, 0P+1P

Uplink Tx Switching 技术可以应用于 EN-DC、CA 和 SUL 技术，分别通过时域和频域两个方面来提升频谱资源的利用。

## Uplink Tx Switching (EN-DC)

运用 Uplink Tx Switching (EN-DC) 后，在 TDD-NR 的上行时隙，原本支持 LTE 的 Tx 转换到 TDD-NR 频段上，这样终端就可以在 TDD-NR 的上行时隙利用 2 个发射通道发射数据，尽可能利用 TDD-NR 的大带宽优势、最大化使用频谱资源。在 TDD 下行时隙和特殊时隙，则转换为 LTE 的发射通道。按照终端的能力不同、所处无线环境的差异等因素影响，终端可以存在以下多种工作模式：



采用 Uplink Tx Switching 增强了上行容量：

3.5GHz 网络引入 Uplink Tx Switching 技术后，在 TDD-NR 的上行时隙终端可以使用两个发射通道同时进行数据发送，在其他时隙采用 FDD-LTE 来保持上行数据的发送，因此上行容量比 SA 架构下 TDD-NR 单载波的峰值要高约 17%。

## Uplink Tx Switching (UL Inter-band CA)

在载波聚合中增加 Uplink Tx Switching，在 TDD-NR 的上行时隙，终端可以利用 2 个发射通道同时发射数据，可以最大化使用频谱资源。典型的使用场景如下图所示：

终端在小区中近点可以利用频段间 CA 技术同时进行上下行传输，获得大带宽和低时延能力；

终端在小区远点利用 FDD 频段上进行数据发送，下行保持 FDD 和 TDD 载波聚合，业务体验速率得到提升。

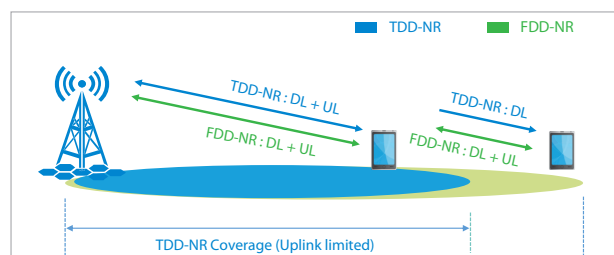


图 支持 Uplink Tx Switching 的 UL CA 使用场景示例

CA 方案通过发射通道切换，可以灵活支持 Option1（在两个载波上时分发送，简称为 TDM 模式）和 Option2（在两个载波上时分发送或者同时发送，简称 TDM+ 并发）两种方式。

按照终端的能力不同、所处无线环境的差异等因素影响，终端可以存在以下多种工作模式：

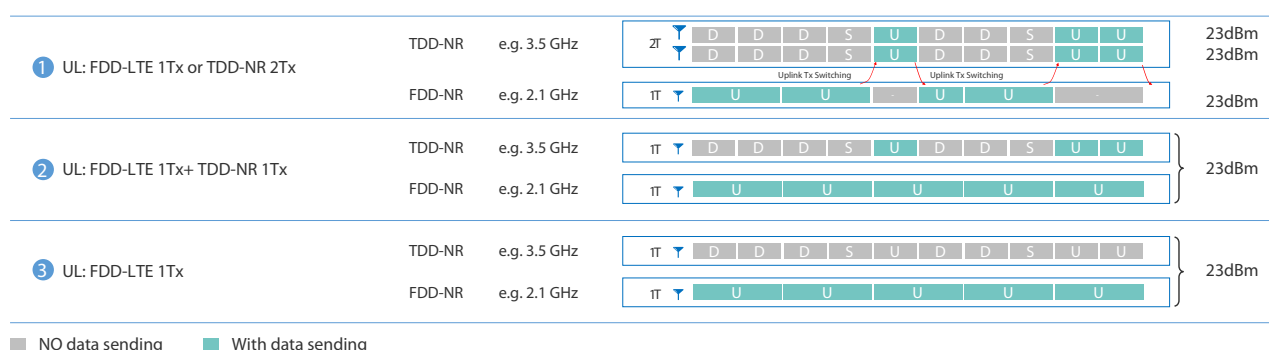


图 支持 Uplink Tx Switching (CA) 的终端上行工作模式

3GPP Rel-16 对载波聚合的频段组合扩充到了 78 种<sup>[1]</sup>，并融入了 Uplink Tx Switching，使得覆盖、容量和时延方面都得到了增强：

#### 覆盖提升

通过 Uplink Tx Switching 技术，终端能够同时连接 FDD 和 TDD 两个载波，即使是在小区边缘也可以使用 FDD 载波，不再因为上行受限而脱离 5G 网络服务。

例如，TDD-NR 采用 3.5GHz、带宽 100MHz 的情况下，增

加 2.1GHz 的 FDD-NR 频段进行载波聚合，在上行链路的边缘速率为 2Mbps 的情况下，采用 Uplink Tx Switching，覆盖比单独采用 TDD-NR 载波时提升 17.8%。

#### 上行容量提升

TDD-NR 采用 3.5GHz、带宽 100MHz 的情况下，增加 2.1GHz 的 FDD-NR 频段进行载波聚合，引入 Uplink Tx Switching 技术后，终端上行容量可以提升 20%。

#### 时延降低

引入 Uplink Tx Switching 后，上行数据的发送无须等到 TDD-NR 的上行时隙才能发送数据、而是拥有 100% 的上行发送时隙，因此下行反馈时延减小 25%。

载波聚合技术在引入 Uplink Tx Switching 后，克服了基于 3GPP Rel-15 UL CA 中不能利用 TDD-NR 双流导致容量损失的问题，从时域和频域两个方面对频谱利用率进行了增强，同时引入功率提升，达到提升上行吞吐量和覆盖的目标。

## Uplink Tx Switching (SUL)

在上行补充增强技术中引入 Uplink Tx Switching 后，系统可以在 TDD 的上行覆盖受限区域增加对 SUL 频段的时频资源利用，因此提升了上行容量。典型的使用场景如右图所示：

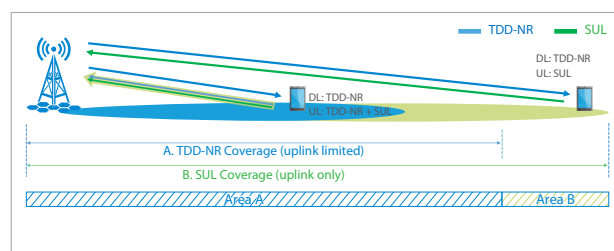
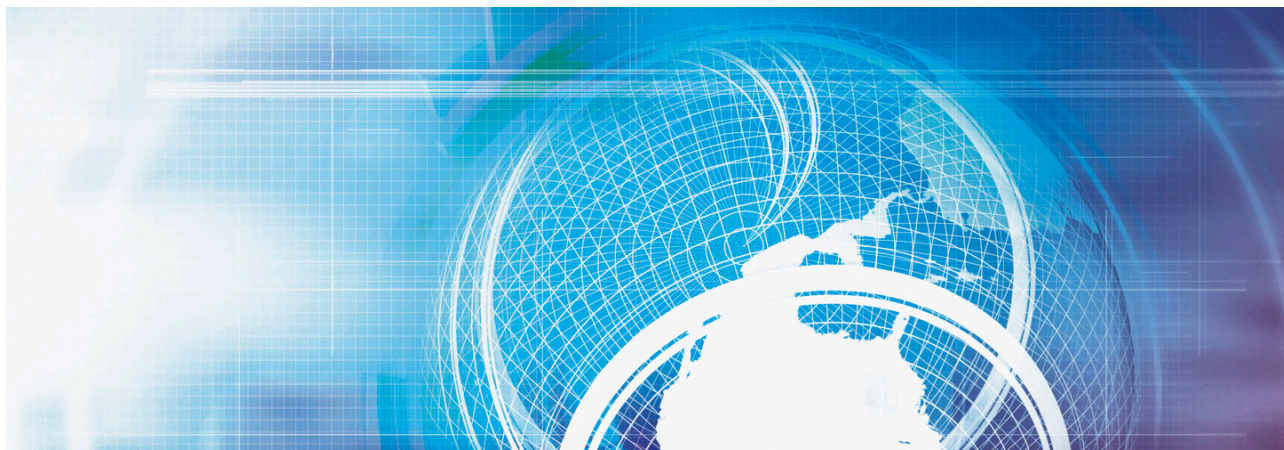


图 支持 Uplink Tx Switching 的 SUL 使用场景



SUL 方案通过发射通道切换，只能支持 option1（在两个载波上时分发送，简称为 TDM 模式）的方式。按照终端所处的无线环境不同，终端可以存在以下两种工作模式：

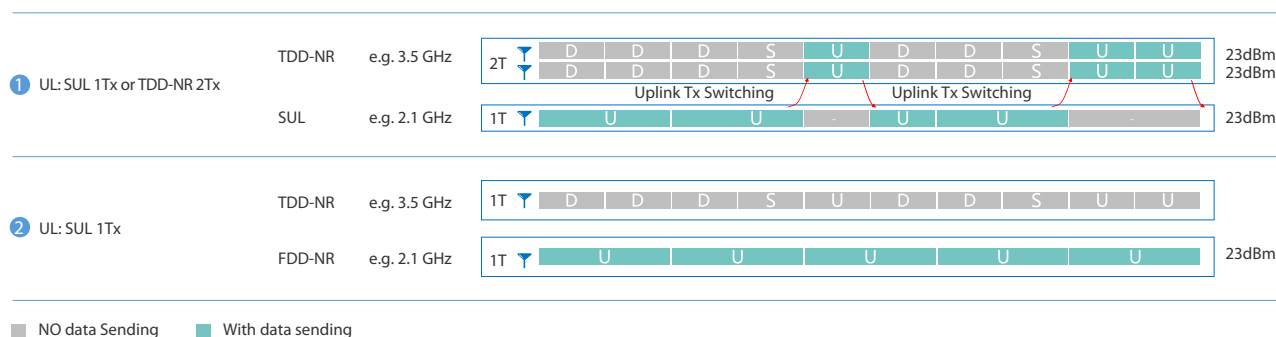


图 Uplink Tx Switching (SUL) 的终端上行工作模式

在小区近点，可以采用 Uplink Tx Switching 的方式在 TDD-NR 和 SUL 频段之间进行切换；在小区中远点，使用 SUL 载波提供上行覆盖。

因此，Uplink Tx Switching 对 SUL 方案的性能提升主要是体现上行容量和时延两个方面，对覆盖没有进一步的增强。

引入 Uplink Tx Switching-SUL 技术后，终端在 TDD 覆盖范围内可以增加对 SUL 时频资源的使用，终端上行容量可以提升 20%。

引入 Uplink Tx Switching 后，上行时隙达到 100% 可以利用，下行反馈时延降低近 20%。

虽然 3GPP Rel-16 中利用 Uplink Tx Switching 对 SUL 进行了增强，但是依旧需要 SUL 和 TDD-NR 共小区，对于实施部署有严格的要求，例如要求支持 TDD-NR 的射频设备和支持 SUL 的射频设备采用共同的工程参数（包括相同的发射方向、相同的天线下倾角等），给实际的部署带来了一定的困难和问题。

此外，由于 SUL 频段依旧需要和 TDD-NR 共小区，所以无法支持跨小区、跨基站、以及宏基站 / 微基站之间的灵活调度功能。

# 上行增强技术对比与分析

## 总体架构对比

针对 5G NR 上行覆盖不足的问题，业界已有多种解决方案，包括 3GPP Rel-15 的双连接（EN-DC）、载波聚合（UL CA）和补充上行链路技术（SUL），并且在 Rel-16 中通过 Uplink Tx Switching 技术进行增强。

- EN-DC 是 5G 部署初期的主要系统架构，产业成熟度高、可以支持多个站点之间的双连接功能。但引入 Uplink Tx Switching 后对终端要求高，暂未看到支持计划；
- CA 是基于 4G 成熟商用的架构，已经在多个 5G 商用网络 / 实验网中进行了测试和验证。在 CA 中引入 Uplink Tx Switching，已经有测试验证案例、并且部分终端芯片厂商已有支持计划。
- SUL 是 5G 新增功能，产业链成熟度不足。由于引入了 SUL 和 NR 载波之间的紧耦合，跨站能力有限，给商用部署引入了新的问题和限制。

	EN-DC	UL CA	SUL	EN-DC with UL Tx Switching	UL CA with UL Tx Switching	SUL with UL Tx Switching
进入的 3GPP 标准	Rel-15	Rel-15	Rel-15	Rel-16	Rel-16	Rel-16
应用 / 产业成熟度	★★★★★	★★★	★★	★	★★★	★★
组网能力 (跨站跨小区)	★★★★★ (支持跨站、跨小区)	★★★★★ (支持跨站、跨小区)	★★ (不支持跨站、跨小区)	★★★★★ (支持跨站、跨小区)	★★★★★ (支持跨站、跨小区)	★★ (不支持跨站、跨小区)

表 上行增强技术的总体对比



## 系统性能对比

为了便于分析和说明，以下就 2.1GHz（带宽 20MHz）+ 3.5GHz（带宽 100MHz），在采用 2.5ms 双周期的帧结构情况下进行系统性能影响的对比和分析。

	基线	3GPP Rel-15			3GPP Rel-16		
	TDD-NR (单载波, SA)	EN-DC	UL CA	SUL	EN-DC with UL Tx Switching	UL CA with UL Tx Switching	SUL with UL Tx Switching
5G 上行覆盖	A	1.18*A	1.18*A	1.18*A	1.18*A	1.18*A	1.18*A
5G 上行峰值速率	B	0.74*B	B	B	1.17*B	1.2*B	1.2*B
HARQ RTT 时延	C	0.75*C	0.75*C	0.8*C	0.75*C	0.75*C	0.8*C
5G 下行峰值速率	D	1.25*D	1.29*D	D	1.25*D	1.29*D	D

表 上行增强技术的性能对比（2.5ms 双周期，2.1GHz（带宽 20MHz）+ 3.5GHz（带宽 100MHz））

## 小结

3GPP Rel-15 阶段引入了各种上行增强技术，包括 EN-DC、CA 和 SUL 等技术，并且在 Rel-16 中利用 Uplink Tx Switching 技术分别对这三种方案进行增强。

针对不同的网络发展策略、频谱策略、以及用户和行业发展规划等，运营商需要从产业链、商用部署和网络性能方面综合考虑如何选择适合的上行增强技术：

产业链必须考虑系统和终端的支持能力、网络的演进能力、标准协议的支持能力、成熟商用部署经验等因素。所以综合来看，CA 是比较合适选择。

5G 商用进程的推进对 5G 网络的性能提出了越来越高的要求，例如覆盖性能好、移动性支持能力强等，因此 5G 的站点选择已经不局限于和 4G 共站部署。因此，上行增强技术需要支持多个频段、多个站点之间的灵活调度和协同能力。SUL 技术由于采用了 NR 和 SUL 频段之间的紧耦合能力，要

求 SUL 和 NR 组成同一个小区、对工程部署要求高，并且不能支持站点之间的灵活协同，提升了商用部署的复杂度，有一定的局限性。

上行增强技术的目标是提升上行覆盖和容量，从这个角度上说 CA 和 SUL 技术都好于 EN-DC 技术。但是 SUL 只考虑上行的增强、引入了上下行的不对称使用，所以对于 DL 的容量没有提升，而 CA 可以同时提升上下行容量和覆盖，达到了频段最佳使用的目标。

因此综合来看，引入 Uplink Tx Switching 后的载波聚合技术，从覆盖、上行和下行容量的提升、以及时延的降低等方面优势最为突出，是 5G 上行增强技术的最佳选择。

# 上行增强技术的演进和发展

随着 NR 新频段不断释放，以及现有 LTE 频段逐步重耕，5G 多频段协同组网将会更加常态化。一方面可获得的频段更丰富，另一方面终端硬件能力演进后处理能力更强，针对不同组网场景和不同应用需求，会有更多的上行增强方案产生。从网络架构角度看，5G 上行增强技术还将会从以下方面进行演进和发展：

## 载波聚合能力的增强，使得载波聚合的潜力进一步被释放

FDD-NR 的大带宽能力，使得载波聚合的潜力进一步释放

FDD-NR 的载波带宽不再局限于 4G 时代的 20MHz，可以支持更大的带宽。例如 1.8GHz ( n3 ) 的单载波带宽可以提升到 30 或者 40MHz，2.1GHz ( n1 ) 频段的载波带宽可以提升到 25、30、40、50MHz。

基于成熟应用和有强大演进能力的载波聚合技术，可以平滑支持这些频段的大带宽，并进一步提升用户吞吐量。

基于成熟商用架构，载波聚合的多频段组合能力逐渐显现

3GPP Rel-16 标准新增了 3 个频段之间、以及 4 个频段之间的载波聚合组合定义，使得载波聚合能力不断增强、载波聚合的应用范围持续扩大，系统的聚合能力更为灵活。

## NN-DC 双连接

在 5G NSA 架构中，终端与 LTE 和 NR 基站同时建立连接（EN-DC），虽然这种双连接方式主要是由于终端要接入 EPC 导致的，但这种双连接方式对高频段的 NR 也起到上行增强作用。例如，当 NR 上行信道质量较差时，终端可以把所有上行数据分流到 LTE 连接上，而下行则可以继续利用 NR 连接。

类似地，5G SA 架构中，终端同样可以与两个 NR 基站建立双连接（NN-DC）关系。当终端连接的两个 NR 基站所用频段相差较大时、特别是当两个 NR 基站分别采用 sub 6G 和 mmWave 频段时，较低频段连接就可以为较高频段连接起到上行增强作用。基于 Uplink Tx Switching 的载波聚合技术同样可以应用于 NN-DC 双连接场景，可以进一步提升 NN-DC 双连接上行容量。

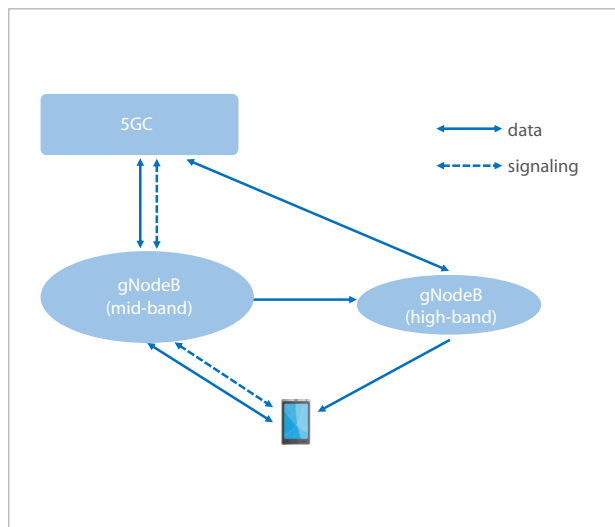


图 NN-DC 系统架构

## TDD 异帧 CA

TDD 频段因为上行时隙占比较低，上行容量和覆盖能力受限制。如果把两个不同 TDD 频段的上行时隙设计为全错开的方式，终端与这两个频段载波同时连接时就可以大大提升上行时隙占比。如下图，以 DDDDDDSUU 帧结构和 DSUUU 帧结构为例，两个上行占比分别为 20% 和 60% 的载波聚合后，终端可以利用两个载波交替发上行数据，互不冲突，上行可用时隙可以提升到 80%。

TDD 异帧上行增强不仅可以提升终端上行时隙占比，还能充分发挥终端的双发能力。当终端连接两个上行时隙完全错开的 TDD 载波时，在每个载波上都能同时激活两个发射通道，利用上行双流进一步提升容量，并降低时延。

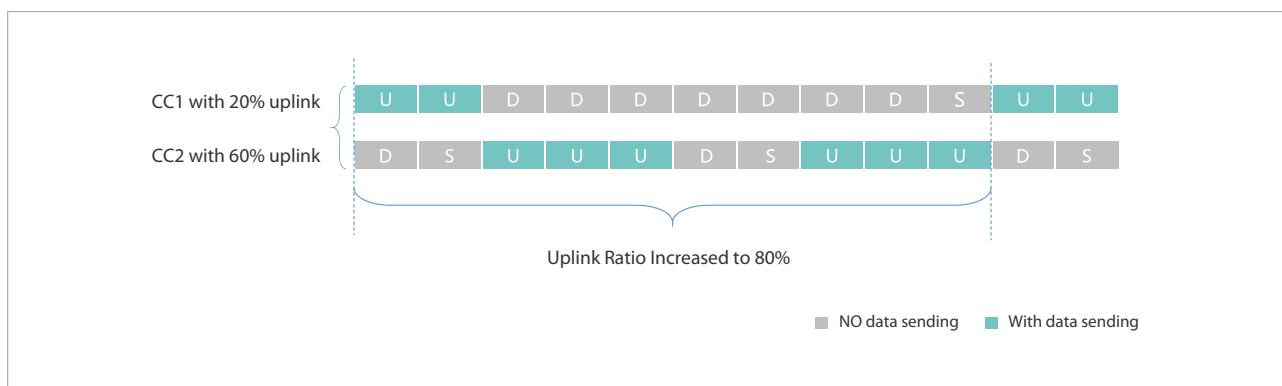


图 两个 TDD 异帧情况下采用 CA 后的终端工作模式



# 总结与展望

TDD-NR（例如 3.5GHz、2.6GHz）作为 5G 网络部署的主力频段，相对于 4G 网络普遍使用的频段，穿透损耗较高、上行占空比较低，在高路损场景下（如室外覆盖室内）其上行覆盖能力存在一定劣势。因此采用单一的 TDD-NR 载波部署一张面向未来演进的高质量、低成本 5G 网络仍存在一定挑战。

针对 5G NR 上行体验不足的问题，虽然业界已有多种解决方案，但是综合对比来看，融合了 Uplink Tx Switching 的载波聚合技术（CA），从时域和频域两个维度同时提升多个 NR 载波的协作聚合能力，从而提升 5G 上行覆盖能力、降低时延、并同时提升上下行容量，是构筑功能、性能和覆盖领先的 5G 高质量网络的最佳上行增强技术。



# 缩略语

缩略语	英文全称	中文全称
ToB	To Business	面向企业客户
Toc	To Customer	面向普通用户
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
5G	5th generation mobile networks	第五代移动通信技术
AR	Augmented Reality	增强现实
CA	Carrier Aggregation	载波聚合
DC	Dual Connectivity	双连接
DL	Downlink	下行链路
eMBB	Enhanced Mobile Broadband	增强移动宽带
EN-DC	E-UTRA-NR Dual Connectivity	以 4G 为主节点,5G 为辅节点的双连接
EPC	Evolved Packet Core	4G 核心网络
EUTRA	Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access	进化的 UMTS 陆地无线接入
FDD	Frequency-division Duplex	频分双工
FR1	Frequency Range 1	频谱范围 1
FR2	Frequency Range 2	频谱范围 2

缩略语	英文全称	中文全称
Massive MIMO	Massive Multiple Input Multiple Output	大规模天线技术
NN-DC	NR NR Dual Connectivity	NR-NR 基站的双连接
NR	New Radio	5G 新空口
NSA	Non-Standalone	非独立组网
PUCCH	Physical Uplink Control Channel	物理上行链路控制信道
Rel-15	Release 15	3GPP Release 15 标准
Rel-16	Release 16	3GPP Release 16 标准
SA	Standalone	独立组网
SUL	Supplementary Uplink	补充上行链路
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TDM	Time Division Mode	时分模式
Tx	Transmitter	发射通道
UL	Uplink	上行链路
UL CA	Uplink Carrier Aggregation	上行载波聚合
uRLLC	Ultra-reliable and Low Latency Communications	超高可靠与低时延通信
VR	Virtual Reality	虚拟现实



## 主要参考文献

**[1]. 3GPP TS 38.101-1:**

“NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone”

**[2]. 3GPP TS 38.213:**

"NR; Physical layer procedures for control".

**[3]. 3GPP TS 38.214:**

"NR; Physical layer procedures for data".

### 中兴通讯版权所有

转载、编摘或利用其他方式使用本白皮书的全部或部分内容的，应注明来源  
违反上述声明者，著作权方将追究其相关法律责任